

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ

ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

FACULTY OF CHEMISTRY

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

# CHOVÁNÍ SUPERABSORPČNÍCH POLYMERŮ V MODELOVÝCH PŮDÁCH

THE BEHAVIOR OF SUPERABSORBENT POLYMERS IN ARTIFICIAL SOILS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ADRIANA MÄNNLOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ROMANA KRATOCHVÍLOVÁ

BRNO 2015



Vysoké učení technické v Brně  
**Fakulta chemická**  
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

## Zadání bakalářské práce

Číslo bakalářské práce:	<b>FCH-BAK0819/2014</b>	Akademický rok: <b>2014/2015</b>
Ústav:	Ústav fyzikální a spotřební chemie	
Student(ka):	<b>Adriana Männlová</b>	
Studijní program:	Chemie a chemické technologie (B2801)	
Studijní obor:	Spotřební chemie (2806R002)	
Vedoucí práce	<b>Ing. Romana Kratochvílová</b>	
Konzultanti:		

### Název bakalářské práce:

Chování superabsorpčních polymerů v modelových půdách

### Zadání bakalářské práce:

Cílem práce je stanovení botnacích charakteristik kompozitů na bázi superabsorpčních polymerů a pozorování jejich chování v modelových půdách.

### Termín odevzdání bakalářské práce: 22.5.2015

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu bakalářské práce. Toto zadání je přílohou bakalářské práce.

-----  
Adriana Männlová  
Student(ka)

-----  
Ing. Romana Kratochvílová  
Vedoucí práce

-----  
prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.  
Ředitel ústavu

V Brně, dne 30.1.2015

-----  
prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Předložená bakalářská práce se zabývá studiem superabsorpčních polymerů pro environmentální a zemědělské aplikace. Obecně mají tyto preparáty plnit funkci závlahovou tak, že díky svým unikátním vlastnostem do sebe dokáží v období dešťů nasát vodu a udržet ji v okolí kořenového systému co nejdéle. Superabsorpční polymery mohou zároveň plnit i funkci nosiče hnojiva a zajišťovat tak jeho postupné uvolňování. Tyto gelové struktury byly podrobeny testování jejich botnavosti v prostředích s různou iontovou silou. Následně byla v delším časovém horizontu sledována jejich schopnost zadržet vodu v prostředí modelové půdy.

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the study of superabsorbent polymers for environmental and agricultural applications. Generally these preparations are to perform the function of irrigation, so that thanks to its unique properties, can absorb water in the rainy season and keep it around the root system as long as possible. Superabsorbent polymers can also perform the function of fertilizer carriers and thus ensure its gradual release. These gel structures were subjected to testing of their swelling in environments with different ionic strength. Subsequently, in the long term monitored their ability to trap water in the soil environment model.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

hnojivo, huminové látky, půdy, gely, superabsorpční polymery

## **KEY WORDS**

fertilizer, humic substances, soil, gels, superabsorbents polymers

MÄNNLOVÁ, A. *Chování superabsorpčních polymerů v modelových půdách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2015. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Romana Kratochvílová

#### Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....

podpis studenta

#### *Poděkování*

*Na tomto místě bych velmi ráda poděkovala mé vedoucí Ing. Romaně Kratochvílové, za velkou pomoc, poskytnutí rad, času a ochoty, které mi pomohly při vypracování mé bakalářské práce.*

## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>CÍL.....</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>9</b>
<b>3.1</b>	<b>HNOJIVA .....</b>	<b>9</b>
3.1.1	Průmyslová hnojiva.....	9
3.1.2	Hnojiva na bázi huminových látek.....	9
3.1.2.1	<i>Dělení huminových látek</i> .....	10
3.1.3	Nové aplikační formy hnojiv.....	11
3.1.4	Systémy řízeného uvolňování v zemědělské praxi .....	11
<b>3.2</b>	<b>SUPERABSORPČNÍ POLYMERY .....</b>	<b>12</b>
3.2.1	Aplikace SAP .....	12
3.2.2	Aktuální stav výzkumu SAP pro půdní aplikace .....	13
3.2.3	Vodní retenční kapacita.....	14
<b>3.3</b>	<b>PŮDA .....</b>	<b>15</b>
3.3.1	Složení půdy.....	15
3.3.2	Chemické a fyzikální vlastnosti půdy .....	16
<b>3.4</b>	<b>GELY .....</b>	<b>17</b>
3.4.1	Vlastnosti a vznik gelů .....	17
3.4.2	Rozdělení gelů.....	17
3.4.3	Reverzibilní gely .....	18
3.4.3.1	<i>Fyzikálně síťované gely</i> .....	18
3.4.3.2	<i>Kovalentně (chemicky) síťované gely</i> .....	19
3.4.4	Botnání .....	19
3.4.4.1	<i>Vliv podmínek na botnání</i> .....	20
<b>4</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>22</b>
<b>4.1</b>	<b>Použité chemikálie .....</b>	<b>22</b>
<b>4.2</b>	<b>Příprava modelové půdy a „water retention“ test. ....</b>	<b>22</b>
<b>4.3</b>	<b>Stanovení stupně botnání .....</b>	<b>23</b>
<b>4.4</b>	<b>Sledování vlivu velikosti částic .....</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUZE .....</b>	<b>25</b>
<b>5.1</b>	<b>Charakterizace vzorků superabsorpčních polymerů .....</b>	<b>25</b>
<b>5.2</b>	<b>Botnací charakteristiky vzorků .....</b>	<b>25</b>
<b>5.3</b>	<b>Vliv velikosti částic na stupeň nabotnění .....</b>	<b>27</b>

5.4	„Water retention“ test	28
6	ZÁVĚR.....	30
7	POPUŽITÁ LITERATURA.....	31
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	34
9	PŘÍLOHA .....	35

# 1 ÚVOD

V současné době je stav půdy v České republice velice špatný. Několik dekad totiž musela trpět pod vlivem nešetrného využívání syntetických hnojiv. Nejvíce se to projevilo na stavu její svrchní vrstvy, což je místo pěstování zemědělských plodin. Tato část půdy ztratila svoji přirozenou schopnost zadržovat vláhu a případné srážky přes ni jednoduše protečou do podzemních vod a rostliny tak zůstávají v převážně suchém prostředí. Dnes pro zemědělce déšť znamená spíše hrozbu odplavení posledních zbytků úrodné půdy nebo dokonce možnost záplav nežli blahodárny účinek. Řešení tohoto problému se nabízí v použití superabsorpčních polymerů.

Superabsorpční polymery byly původně vyvinuty za účelem zemědělské aplikace ve formě půdního kondicionéru. Jejich aplikace však díky jejich unikátním vlastnostem přešly spíše na pole využití v oblasti hygienických sacích produktů. Dnes však vědci obnovili svůj původní záměr a vrátili se k vývoji environmentálních přípravků, které mají půdě napomoci s lepším hospodařením s vodou.

Gelový charakter superabsorpčních polymerů nabízí s novými poznatky o nosičových a transportních systémech využívaných především v medicínských aplikacích rovněž možnost svého využití v dávkování hnojivových přípravků. Aplikované hnojivo by se mohlo stát součástí již zmíněného superabsorpčního polymeru a z jeho struktury by se tak k rostlině uvolňovalo postupně. Předpokládá se, že celkový objem aplikovaných hnojiv by se mohl snížit až na 30 % oproti dosavadnímu množství. Což má obrovskou výhodu jak z pohledu environmentálního, tak z hlediska ekonomického [1, 2, 3].

## **2 CÍL**

Cílem této bakalářské práce je prozkoumání botnacíh charakteristik superabsorpčních polymerů připravených v rámci smluvního výzkumu Fakulty chemické Vysokého učení technického v Brně s firmou Amagro s.r.o. Botnaní je pozorováno v různých prostředích lišících se jejich iontovou silou. Na základě předkládané rešerše byly provedeny testy s modelovými půdami, které mají charakterizovat schopnost zkoumaných superabsorpčních polymerů zadržet vodu v půdě. Dále byl zkoumán vliv velikosti xerogelových granulí na stupeň nabotnění polymeru.



### 3 TEORETICKÁ ČÁST

#### 3.1 HNOJIVA

Hnojiva představují neodmyslitelný prostředek ke zvyšování úrodnosti půdy. Jedná se o látky, které dodávají rostlinám výživu a biogenní prvky, jako je dusík N, fosfor P a draslík K, které jsou pro výživu a růst rostlin velice důležité. Hnojiva tedy působí na růst, vývoj rostliny a tím i na jejich kvalitu a úrodnost. Při hnojení se musí dbát zřetel na klimatické podmínky, půdní vláhu a také na ekologické podmínky. Hnojiva jsou obvykle aplikována přes půdu pro výživu přijímanou skrze kořenový systém nebo postřikem listů v případě látek vstřebatelných přes kutikulu.

V praxi se pro podporu fyziologických funkcí rostlin běžně využívají jak průmyslová hnojiva, která mají původ v syntetické výrobě, tak i látky přírodního charakteru. Oba typy produktů jsou rozvedeny v kapitolách 3.1.1 a 3.1.2.

##### 3.1.1 Průmyslová hnojiva

Jako průmyslová hnojiva se označují chemické sloučeniny a jejich směsi, které dodávají ve vstřebatelné formě rostlinám chemické prvky, především dusík, fosfor a draslík, které jsou pro růst rostlin nezbytnou součástí. Použití průmyslových hnojiv je jedním z rozhodujících kontrolovatelných faktorů ovlivňujících výrobu potravin, krmiv a také některých přírodních surovin. V tomto směru mají průmyslová hnojiva nezastupitelnou roli při řešení problému s celosvětovým nedostatkem potravy. Tato skutečnost je pro současný i budoucí výhled spotřeby průmyslových hnojiv rozhodující. Největších objemů dosahuje výroba a spotřeba dusíkatých a fosforečných hnojiv, která obsahují chemicky vázaný dusík a fosfor v rozpustné formě. Hnojení anorganickými i organickými hnojivy představuje často hlavní zdroj dusíku v mnoha systémech a zároveň také řeší nedostatek vhodné formy rostlinami přijatelného fosforu ve většině půd.

Průmyslová hnojiva se dělí podle fyzikálního stavu, ve kterém se vyrábějí a aplikují, na pevná a kapalná. Pevná pak mohou dále být krystalická (např. síran amonný), či granulovaná (např. dusičnan amonný nebo NPK) nebo také prášková. Průmyslová hnojiva se mohou rozdělit podle obsahu výživných složek na *jednosložková*, ta obsahují pouze jednu živinu. Mezi jednosložková hnojiva řadíme dusíkatá (N), fosforečná (P) a např. draselná (K). Dále existují i *vícesložková*, jež obsahují více složek a jedná se zejména o NP, PK, NK nebo NPK [4].

##### 3.1.2 Hnojiva na bázi huminových látek

Huminové látky (HL) představují skupinu vysokomolekulárních a nízkomolekulárních látek, které vznikají chemickými i biologickými rozklady organických hmot, čili rozkladem zbytků odumřelých těl rostlin a živočichů. Tento proces se označuje jako *humifikace*. HL byly poprvé zmíněny již v roce 1786 německým vědcem F. Achardem. Jedná se převážně o cyklické sloučeniny aromatického charakteru. Přítomnost HL na Zemi je neodmyslitelná, zastupují asi 80 hm. % suchozemského uhlíku a okolo 60 hm. % uhlíku rozpuštěného ve vodních zdrojích. Bez HL by nebyl život na zemi možný. Tyto látky pomáhají vytvářet příznivé prostředí pro život důležitých půdních mikroorganismů, usnadňují transport živin z půdy do rostlin a půdě napomáhají zadržet vodu. Tyto zmíněné vlastnosti se dají obecně shrnout do několika funkcí

– ochranné, zásobní a regulační. Obsah HL v půdách činí okolo 3 hm. %. Nejlepším zdrojem pro HL představuje lignit, který se v České republice vyskytuje poměrně hojně, což činí jeho těžbu snadno dostupnou a ekonomicky přijatelnou. Je známo, že HL zvyšují aktivitu enzymu protonové pumpy, která reguluje transport živin do rostliny. Rostliny, které jsou ošetřovány HL, proto rychleji rostou [5, 6, 8].

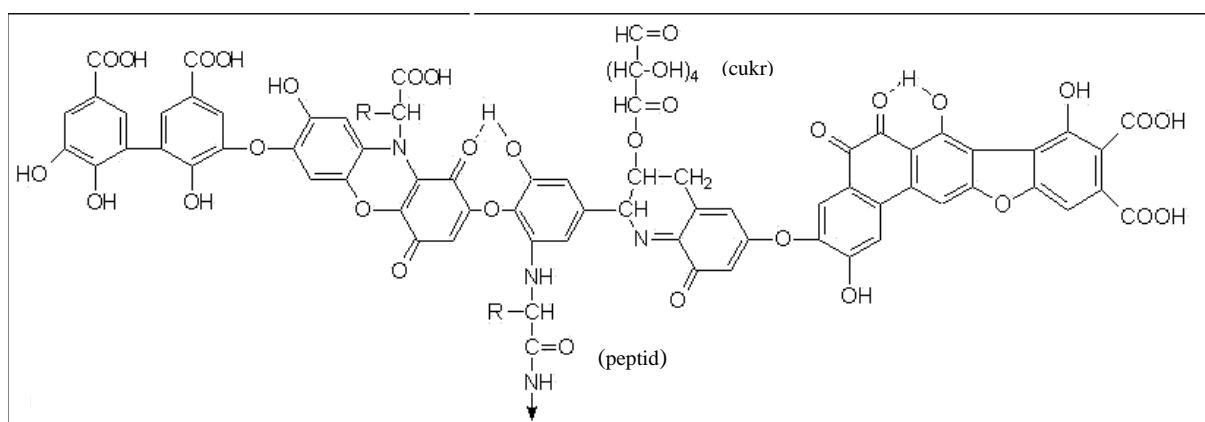
### 3.1.2.1 Dělení huminových látek

HL se mohou dělit na tři skupiny, největší skupinou jsou *huminové kyseliny* (HK) dále *fulvokyseliny* (FK) a *huminy* (HU).

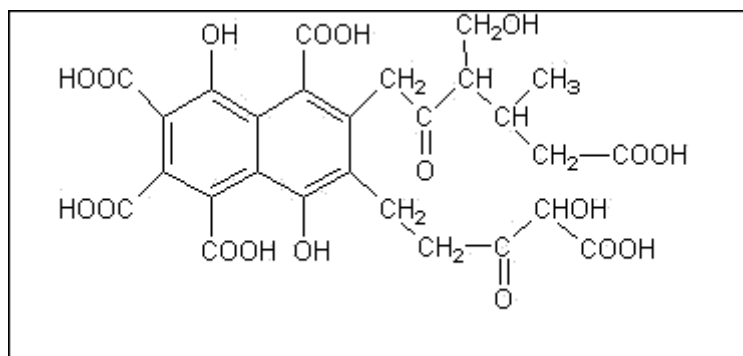
Nejvíce zastoupenou skupinou HL jsou HK. Tato frakce je rozpustná při vysokých pH a má spíše tmavou barvu. Jsou rozpustné v roztocích alkalicky reagujících látek, to je při vyšším pH, ale špatně rozpustné při nízkém pH. Jsou nejvýznamnější skupinou HL z hlediska zemědělských aplikací. S vápníkem a hořčíkem tvoří ve vodě nerozpustné humáty vápenaté nebo hořečnaté, které ovlivňují příznivě technologické vlastnosti půd všech druhů. Struktura HK není dosud objasněna. Existuje hned několik teorií, které popisují jejich struktury, ale ty se od sebe často podstatně odlišují. Jedna z teorií předpokládá, že HK jsou velké částice (asi 6 – 8 nanometrů) kulovitěho tvaru a jejich roztoky mají koloidní povahu. Takováto struktura molekuly HK je znázorněna na *Obrázku 1*. V molekule HK se nalézají zbytky různých látek, ze kterých vznikaly, jako jsou aminokyseliny, fenoly a podobné látky. Velmi významné jsou chinoidní skupiny, které zprostředkují přenos kyslíku. O základním složení HK je známo, že obsahují ve své struktuře uhlík, dusík, kyslík a popřípadě další prvky jako je fosfor aj. Obsahují 52 – 62 hm. % uhlíku, 2,5 – 5 hm. % vodíku, 3 – 5 hm. % dusíku a 30 – 39 hm. % kyslíku. Stáří uhlíku v HK se předpokládá na 750 let.

FK jsou rozpustné jak v zásaditém tak v kyselém prostředí. Strukturu FK je zobrazena na *Obrázku 2*. Mají světležlutou až žlutohnědou barvu. Obsahují o něco méně uhlíku - pod 50 hm. % a dusíku méně než 3 hm. %. Předpokládá se, že oproti HK mají menší molekulu.

HU nejsou rozpustné ve vodných roztocích, mají černou barvu [6, 7, 8, 10].



*Obr. 1 Předpokládaný základní strukturní motiv huminových kyselin podle Stevensona (dostupné z [9] )*



Obr. 2 Struktura fulvokyseliny (dostupné z [9])

### 3.1.3 Nové aplikační formy hnojiv

Jak bylo zmíněno v kapitole 3.1, hnojiva se nejčastěji vyskytují ve formě postřiků a prášků, které se aplikují přímo na listy cílené rostliny nebo pak v podobě různých granulí do půdy do oblasti kořenového systému rostliny. Z takto podaného hnojiva se však k rostlině dostane jen velmi malé množství. Odborná literatura dokonce uvádí, že v případě postřiků se jedná o pouhou jednu třetinu z celkového aplikovaného množství. Převážná většina těchto účinných látek se tedy vůbec k cíleným rostlinám nedostane a je odváta povětrnostními vlivy, případně smyta srážkovou vodou. Problém však není pouze v ekonomických ztrátách, ale i ve znečišťování životního prostředí. Hnojivo, které není využito rostlinou, se ve většině případů dostává do zdrojů pitných vod, popřípadě do ovzduší a přichází tak do kontaktu s každodenní činností člověka [4, 11].

Cílem nejednoho vědeckého týmu je tedy vyvinout takovou formu hnojiv, která by toto znečišťování životního prostředí zamezila a zároveň tak snížila jejich celosvětovou spotřebu. Člověk už ví, které látky podporují růst rostlin, popřípadě které látky zvyšují úrodnost plodin. Otázkou však stále zůstává v jaké formě tyto látky rostlinám „nabídnout“. Inspirace se nabízí třeba v dnes tak hodně diskutovaném farmaceutickém průmyslu. Obecně je známo, že léky jsou do organismu vpravovány nejen v jejich čisté formě, ale v systémech, které zprostředkovávají jejich cílené a pozvolné uvolňování. A takové systémy by se daly využít rovněž i při dávkování hnojiva [11].

### 3.1.4 Systémy řízeného uvolňování v zemědělské praxi

Systémy řízeného uvolňování hnojiva (dále jen CRF – *controlled release fertilizers*) jsou v poslední době velmi žádané v zemědělské praxi. Díky neustále se zvyšujícímu množství hnojiva na celém světě je tento typ nosičů stále více populární. Je známo, že rostliny jsou schopny přijmout kolem 30 hm. %, v lepších případech až 50 hm. % z celkového množství dodaného hnojiva [11]. Ke ztrátě hnojiv může docházet z různých důvodů. Velká většina se odplaví do podzemních vod a tím dojde k jejich znehodnocení nebo se odpaří do ovzduší. V ovzduší tak může dojít ke vzniku kriticky vysokých hodnot oxidu dusného, který způsobuje ničení ozonové vrstvy v atmosféře. Část hnojiv podléhá mikrobiálnímu rozkladu a chemickým procesům, produkty těchto reakcí mohou mít nepříznivý vliv na životní prostředí. Velké dávky hnojiv s obsahem dusíku vedou ke špatné úrodě, ale mohou působit i negativně na zdravotní stav obyvatel, kteří žijí v poškozené oblasti a samozřejmě i na hospodářská zvířata. Dále zvyšují salinitu půdy a koncentraci těžkých kovů. Proto neustále

vzrůstá poptávka po CRF, které jsou variabilní, co se týče dávkování živin pro různé typy plodin. Hlavní živiny důležité pro růst rostlin jsou dodávány prostřednictvím komerčních hnojiv na bázi prvků N, P a K ve formě solí. Tyto hnojiva mají tendenci podléhat již zmíněným vedlejším procesům, jako mikrobiální rozklad. A právě aplikací těchto živin do systému CRF by snížila ztráty způsobené rozkladem [22].

Pokud je hnojivo aplikováno do půdy ve formě CRF, tak to znamená, že nosič obsahuje živinu potřebnou pro metabolismus rostliny, ale tato látka se pro rostlinu stává dostupnou až po určité době. Ve většině případů je potažena anorganickým nebo organickým materiálem, který se časem rozloží a tím poskytuje rostlině opožděné dávkování hnojiva. U těchto typů nosičů je živina uvolňována např. pomocí polopropustné membrány, nebo rozpadem obalu hnojiva [23].

Jako obalový a enkapsulační materiál se začal aplikovat polyhydroxybutyrát. Tato látka, se může vyskytovat v několika formách – vlákno, nástřík, film, obal. Tento plast byl vlastně vyvinut na výrobu cigaretových filtrů, které lidé často odhazují na zem a proto je potřeba, aby se co nejdříve rozložily. Umí se rozkládat za aerobních tak i anaerobních podmínek, díky této vlastnosti se stává důležitým nástrojem pro zajištění řízeného uvolňování hnojiv, pesticidů, herbicidů a dalších látek. Může být využit na výrobu prostředků zajišťujících mechanickou obranu půdy [24].

Mezi nové aplikační formy hnojiv se řadí superabsorbční polymery, které budou blíže specifikovány v následující kapitole.

### **3.2 SUPERABSORPČNÍ POLYMERY**

Superabsorbční polymery (dále jen SAP) jsou materiály, které mají schopnost absorbovat a zadržet v sobě poměrně velké množství vody nebo vodných roztoků. V současné době se vědci snaží modifikovat strukturu těchto látek tak, aby byla jejich schopnost pohlcení vody co nejvyšší, proces nabotnutí co nejrychlejší, a aby struktura byla co nejpevnější [10]. SAP jsou trojrozměrné zesíťované hydrofilní polymery schopné zadržet obrovské množství vody. Většina SAP jsou na bázi akrylových monomerů, jako je akrylamid a kyselina akrylová. Polymery jsou převážně připravovány ve formě suchých a tvrdých granulí, které se v přítomnosti vody přemění na gel. Vodu, kterou SAP absorbuje, jde velmi těžko odstranit a to i pod tlakem. Tato jejich ojedinělá a užitečná vlastnost má mnoho využití především tam, kde je zapotřebí zadržet velké množství vody, což je u jednorázových dětských plenek, dámských hygienických prostředků a také v zemědělské a zahrádkářské půdě [12, 13, 14].

#### **3.2.1 Aplikace SAP**

SAP jsou díky svým unikátním vlastnostem, které byly zmíněny v předchozí kapitole, využívány v mnoha aplikacích a to nejen jako výrobky nezbytné v běžném životě, ale své uplatnění nacházejí také v zemědělství a zahrádkářství, ale také při ochraně životního prostředí.

Asi nejvíce známá je jejich přítomnost v dětských plenách, kde je zadržování tekutiny nutností a v hygienických pomůckách, jako jsou menstruační vložky. Všechny produkty se SAP mají za úkol sát a zadržovat vodu nebo jinou tekutinu. Cílem těchto produktů je neustálé

zvyšování savosti a co nejlépe zadržet vodu v polymerní síti [12, 13]. V plenách nabotnaný gel zadržuje tekutiny v pevném, gumovitém stavu a zabraňuje jejímu kontaktu s pokožkou dítěte. Rychlost absorpce pleny nesmí být pomalejší než rychlost močení dítěte, jinak by mohlo dojít k úniku tekutiny, což je u plen nežádoucí efekt. Rychlost absorpce tekutiny do SAP je ovlivněna maximální absorpční kapacitou polymeru, velikostí jeho částic a jejich tvaru [15]. Vliv velikost částic je objasněno v publikace [27].

Stále vyšší množství půdy je znehodnocováno a to hlavně působením činností člověka. Velkým problémem je úbytek organické složky v půdě, které je její nedílnou součástí. Proto v současnosti patří SAP mezi nejvíce pokrokové zemědělské technologie. Díky svým unikátním vlastnostem jsou SAP aplikovány přímo do půdy. SAP musí splňovat velké nároky na strukturu půdy. Hrají velkou roli v klíčivosti rostlin, a to i v suchých a polosuchých oblastech, protože jsou schopny prodloužit dobu využití půdní vody rostlinami i tam, kde je závlaha přerušena. Tím, že jsou aplikovány do okolí kořenového systému rostliny, tak udržují vláhu ve vnější vrstvě půdy, která je velice náchylná na vysychání. SAP tedy mohou nahrazovat systém zavlažování, čímž se omezuje úmrtnost rostlin. Na schopnost SAP vázat vodu má vliv i obsah nečistot ve vodě nebo vyšší obsah minerálů. Transkripce, nebo-li výdej vody povrchem rostlin, je rovněž ovlivněna zavedením SAP do půdy [16, 17, 18].

SAP v půdě mají omezenou životnost, která se značně mění v závislosti na některých faktorech. První důležitou roli hraje jejich chemická struktura, polymery mají životnost maximálně 3 roky, zatímco kopolymery mohou mít životnost až 5 let. Životnost je ovlivněna síťováním. Pokud je stupeň síťování velký, tím déle je voda dostupná a tím má i SAP delší životnost. V neposlední řadě hraje velkou roli také kvalita vody [26].

Přidáním HL do půdy spolu se SAP má velice užitečné vlastnosti. Aplikací do půdy se zajistí udržení úrodnosti půdy. HL vážou těžké kovy a tím brání, aby se kovy dostaly do zemědělských plodin, protože mají na rostliny negativní vliv. Jedná se o látky s výbornou biologickou účinností, přispívají ke zvyšování odolnosti rostlin k nepříznivým činitelům a zvyšují účinnost minerálního hnojení [16, 17, 18].

SAP umí minimalizovat nepříznivý vliv zvyšující se salinity půdy na růst rostlin. Zasolování půdy je celosvětový problém, jde o zadržování rozpustných solí v půdě. Díky lidské činnosti a především aplikováním draselných hnojiv neustále vzrůstá salinita půdy. I přestože je botnání SAP znatelně menší v přítomnosti soli, dokáže v sobě hydrogel udržet dostatečné množství kapaliny pro potřebnou závlahu [10, 13].

### **3.2.2 Aktuální stav výzkumu SAP pro půdní aplikace**

Kopolymery SAP byly v publikace [3] připravovány v různých reakčních podmínkách za použití několika možných kombinací 3 různých monomerů. Takto připravené SAP byly prozkoumány z hlediska jejich botnacích vlastností ve vodě a v solných roztocích. Z výsledků těchto experimentů vyplývá, že nejvíce jsou schopny vodu nasát SAP připravené z monomeru akrylamidu, akrylátu, 2-hydroxyethylmetakrylátu a kombinací monomeru akrylamidu, kyseliny akrylové a akrylátu sodného. Tyto vzorky byly rovněž použity přímo jako přídavek k substrátu rostliny druhu kroton. Rostliny s přídavkem SAP v pěstební půdě stačilo zalévat pouze jedenkrát za měsíc, kdežto normálně pěstované rostliny bylo nezbytné zalévat jedenkrát

týdně minimálně. Dlouhodobějším pozorováním vyplynulo, že SAP mají i velice pozitivní vliv na růst rostlin, což se projevilo až trojnásobnou výškou oproti rostlinám pěstovaným bez přidavku SAP.

V publikaci [12] byla zkoumána syntéza SAP s přidavkem humátu sodného a následně botnací charakteristiky výsledných produktů. Byl sledován vliv teploty na botnací vlastnosti polymeru. V případě, že teplota je příliš nízká, tak se nemůže vytvořit trojrozměrná polymerní síť, což má za následek pokles absorpce vody. Pokud je teplota příliš vysoká, rychlost reakce se výrazně zvýší, takže dojde ke větší spotřebě tepla v průběhu procesu, dochází tedy i ke snížení molekulové hmotnosti a tím klesá savost polymeru. Byla zjištěna podstatná věc, že přidavkem humátu sodného ve struktuře SAP se zvyšuje jeho botnací schopnost o 5,3 hm. %, což je způsobeno přítomností skupin  $-\text{CONH}_2$  a  $-\text{OH}$  ve struktuře humátu.

V článku [19] byly mezi sebou pozorovány botnací charakteristiky 3 druhů SAP za použití různých síťovacích činidel. SAP byly připraveny z monomerů kyseliny akrylové, sodné soli kyseliny akrylové a akrylamidu. Bylo pozorováno, že u nižších koncentrací síťovacího činidla bylo dosaženo konečné absorpce u hrubých částic již po 60 s a u menších částic to bylo přibližně po 30 s. Při vyšších koncentracích síťovadla, byla absorpce mnohem rychlejší, u hrubých částic bylo dosaženo konečné hladiny při 30 s, ale u menších částic zůstal čas nezměněn. Čím je stupeň síťování vyšší, tím lépe je voda sorbovaná do SAP.

V publikaci [27] byly pozorovány botnací charakteristiky SAP za různých podmínek. První podmínkou byla různá pH, pH byla nastavena od 2 do 6. A největšího otoku bylo dosaženo při nejvyšší hodnotě pH, tedy při pH 6 a nejmenšího při pH 2. Dále byla pozorována botnací schopnost ve vodě s obsahem soli NaCl (chlorid sodný). Bylo dokázáno, že při stále se zvyšující koncentraci soli, byla schopnost SAP vázat tekutinu nižší a mnohem pomalejší, nejlépe tedy absorbuje jen ve vodě. Protože roztok soli má velký vliv na osmotický tlak, tak při stále se zvyšující koncentraci soli se také zvyšuje osmotický tlak vnějšího roztoku. Tím dochází k velkým rozdílům tlaků mezi vnějším a vnitřním prostředím a zmenšuje se rychlost absorpce vody do SAP. Důležitým faktorem je i velikost částic SAP. Nejlépe a nejrychleji umí sorbovat tekutiny menší částice než větší. A to samé platí i v roztoku soli, dosažení rovnováhy a zadržování vody je lepší u malých částic.

### 3.2.3 Vodní retenční kapacita

Retenční vodní kapacita (dále jen WRC – *water retention capacity*) charakterizuje množství vody, které je půda schopna zadržet v systému kapilárních pór a postupně ji dokáže uvolňovat pro potřeby rostlin. Vodní režim půd se skládá z několika fází – akumulární a perkolační. Na WRC mají velký vliv i srážky. Během akumulární fáze se voda ze srážek akumuluje v půdním profilu a následně je čerpána rostlinami pro potřeby transpirace. Tato fáze může trvat až několik týdnů, dokud není voda z půdy vyčerpána až k dolní hraniční hodnotě a tím kvůli nedostatku vody v půdě dojde k zastavení transpirace. Pokud ovšem dojde k velkým srážkám, voda se akumuluje v půdě, dokud nepřekročí určitou vodní hranici. Pak dochází k náhlému odtoku velkého množství vody do podloží, aniž by byla v půdě zadržena. Trvání perkolační fáze je závislé na srážkové činnosti a na objemu vody v půdě při jejím nastartování, může trvat od několika hodin až po několik týdnů. Rozdíl mezi horní a dolní

hodnotou objemu vody v půdě je WRC. Vodní retenční kapacita je ovlivněna i typem půdy, podle velikosti a počtu pórů v půdě, může se tak rozlišovat písčité či prachové. Tato kapacita vzrůstá s hloubkou půdního profilu. Na kapacitu mají vliv i vnější podmínky [20, 21, 25]. Retenční vodní kapacita je ovlivněna přítomností vápníku, s větším obsahem vápníku ve vodě, klesá životnost SAP aplikovaného do půdy [26].

### 3.3 PŮDA

#### 3.3.1 Složení půdy

Půda je nedílnou součástí přírodního prostředí a může být vnímána jako přírodní útvar umožňující růst rostlin. Jiná definice říká, že půda je dynamický přírodní útvar tvořený minerálním i organickým materiálem a živými organismy, ve kterém rostou rostliny. Půda vzniká a vyvíjí se z povrchových zvětralin zemské kůry a zbytků organismů, působením půdotvorných faktorů a je schopná zajišťovat životní podmínky organismům, které v ní žijí. Půda vzniká a vyvíjí se po velmi dlouhou dobu, zvětráváním hornin a minerálů pochody jak fyzikálními tak i chemickými. Procesy vzniku půdy jsou obecné a platné pro všechny půdy a přírodní podmínky. Na tvorbě půd se podílí tzv. půdotvorné faktory, jejichž výsledkem vzniká půda konkrétních vlastností, která se nadále během času vyvíjí. Půda tvoří nejsvrchnější vrstvu zemské kůry, je propustná pro vodu, vzduch a organismy. Na půdu je třeba vždy pohlížet jako na dynamický přírodní útvar, který se tvoří, vyvíjí a udržuje pod vlivem okolního prostředí.

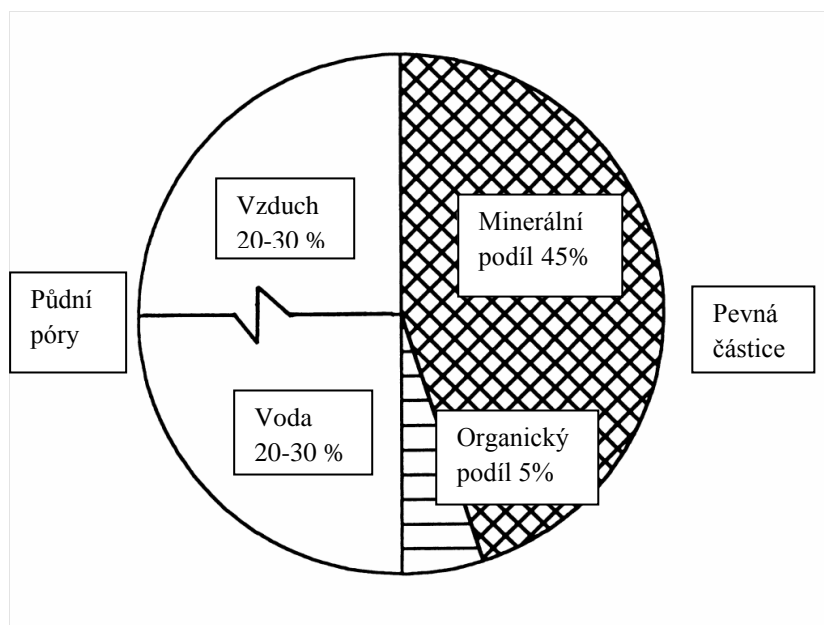
Půda je složena z několika významných složek. Složky půdy dělíme na živou a neživou část. Větší zastoupení je v neživé části, kam se řadí minerální částice, organická hmota, voda a vzduch. Průměrné zastoupení jednotlivých složek minerální půdy je vyobrazeno na *Obrázku 3* [28, 29, 30, 31].

K živým složkám půdy patří *organická hmota*. Primárním zdrojem půdní organické hmoty jsou rostliny, rostlinné zbytky a různé části rostlin včetně kořenů. Sekundárním zdrojem jsou živočichové a půdní mikroorganismy. Část organické hmoty v půdě, která prošla procesy přeměn, k nimž patří syntetické a rozkladné procesy, se nazývá humus. Humus je zásobárnou živin pro rostliny a zdrojem energie. Obecně se obsah organické hmoty snižuje směrem do hloubky půdního profilu. Bez organismů půda přestává být půdou a stává se pouhým substrátem [29].

*Minerální podíl*, je tvořen nejrozličnějšími anorganickými sloučeninami a částicemi různé velikosti, od velkých úlomků hornin, až po koloidní částice. Různé velikosti skupin minerálních částic určují zrnitost půdy. Minerální podíl tvoří jílové minerály (až 75 hm. %), oxidy a hydroxidy (10 – 15 %) a primární minerály (7 – 10 %). K jílovým minerálům patří skupiny montmorillonitu. Skupina montmorillonitu tvoří převážně kvalitní půdy se značnou sorpcí živin a vody. Při tom umožňují jejich postupné uvolňování pro rostliny. Převažuje v půdách černozemního typu. Oxidy a hydroxidy vznikají zvětráváním primárních minerálů (křemen, živce, slídy, amfiboly, augity aj.) nebo mineralizací (rozkladem) organických zbytků v půdě. Také mají určitou schopnost poutat živiny do forem přijatelných pro rostliny. Mohou postupně ztrácet vodu a krystalizovat. Primární minerály (křemen, živce, pyroxeny, slídy a další) se v půdě nacházejí

ve formě větších částic (prach, písek, šterk). Pro pomalé zvětrávání je jejich vliv na výživu rostlin zanedbatelný [29, 31, 33].

*Půdní voda* představuje kapalnou fázi půdy. Ve skutečnosti jde o půdní roztok různých minerálních a organických látek. Z fyzikálního hlediska se půdní voda dělí na gravitační, kapilární a hygroskopickou. Gravitační voda je přítomna v půdě pouze po silných deštích, proto ji rostliny nestihnou využít. Kapilární voda se nachází v pórech a hygroskopická je v půdě silně vázaná a mohou ji přijímat jen některé mikroorganismy. Koncentrace půdního roztoku se mění vlivem působení řady fyzikálních, chemických a biologických procesů v souvislosti s vlhkostí, teplotou, provzdušením půdy, složením pevné fáze půdy aj. Půdní roztok v souvislosti s těmito podmínkami obsahuje řadu rozpuštěných minerálních i organických látek v různém množství a poměru. Půdní vzduch představuje plynnou fázi půdy, nachází se v půdních pórech, které nejsou zaplněny půdní vodou. Půdní vzduch má odlišné složení od atmosférického vzduchu. Půdní vzduch může mít často až 100% relativní vlhkost, obsahuje více CO<sub>2</sub> a méně O<sub>2</sub>. Dostatek vzduchu v půdě je zárukou zvýšené biologické činnosti a tím i uvolňování živin mineralizací organických látek [29, 31, 32, 33].



Obr. 3 Průměrné zastoupení jednotlivých složek minerální hlinité půdy ve stavu příznivém pro růst rostlin

### 3.3.2 Chemické a fyzikální vlastnosti půdy

Jednou z nejdůležitějších chemických charakteristik půdy je reaktivita půdy, respektivě půdního roztoku. Rozeznávají se tři druhy půdních reakcí: aktivní, výměnná a reziduální neboli zbytková. Aktivní reakce je vyvolána výskytem volných iontů H<sup>+</sup>. Výměnné reakce ovlivňuje kyselost. Většina půd má tendenci se okyselovat, v důsledku přísunu iontů H<sup>+</sup>. Mnoho chemických i biologických procesů v půdě závisí na množství vodíkových kationtů H<sup>+</sup> v půdě a hydroxylových aniontů OH<sup>-</sup>. Distribuci kationtů v půdě do značné míry ovlivňuje pH. Další vlastností půdy je pufrovitost půdy. Pufrovitost je schopnost odolávat změnám pH půdního roztoku. K chemickým vlastnostem půdy se řadí i elementární složení půdy,



minerální složení půdy, složení půdního roztoku, obsah a složení půdní organické hmoty [29, 30, 32].

Mezi fyzikální vlastnosti půdy se řadí velká škála faktorů, jako je struktura půdy, její zrnitost, vlhkost, konzistence a velmi důležitý faktor barva.

*Strukturou půdy* se rozumí prostorové uspořádání elementárních částic. Velikost minerálních částic v půdě, respektive zastoupení jednotlivých velikostních kategorií, zásadně ovlivňuje fyzikální a chemické vlastnosti půdy. Postupně byly vytvořeny různé systémy třídění částic podle velikosti. Nejjednodušší stupnice rozlišuje kategorie štěrk, písek, prach a jíl. Jednoduše se dají půdní druhy rozdělit podle textury na půdy písčité, hlinité a jílovité. Půdu lze rozdělit podle zrnitosti do 7 kategorií, na písčitou, hlinitopísčitou, písčitolhinitou, hlinitou, jílovitolhinitou a jílovitou. Na tvorbě struktury se mohou významně podílet objemové změny půdy při střídavé vlhkosti [29, 32].

*Vlhkostí půdy* se obecně rozumí momentální relativní obsah půdy. Podle obsahu půdy označujeme zeminu jako suchou, vlahou, vlhkou a mokrou [26].

Mezi fyzikální vlastnosti půdy patří i její *barva*. Barva je jednou z nejdůležitějších a nejužitečnějších charakteristik půdy. Barva půdy může být měřítkem obsahu organické hmoty, stupně a intenzity půdního zvětrání, vegetaci, která se podílela na utváření dané půdy [32].

### 3.4 GELY

#### 3.4.1 Vlastnosti a vznik gelů

Na základě struktury lze gel popsat, jako koloidní systém tvořený trojrozměrnou makromolekulární sítí, vytvářející souvislou strukturu. Tato strukturu prostupuje celým disperzním prostředím. I když je disperzní prostředí kapalné, mají gely povahu tuhé látky. Vytvoří – li se mezi makromolekulami dostatečný počet uzlů, může dojít ke vzniku sítě. Síť může vzniknout z lineárního polymeru nebo jeho roztoku. Spoje neboli uzly, mohou vzniknout chemickou reakcí, mluví se tedy o kovalentních sítích tedy *kovalentně síťovaných gelů*. Jinou možností je vznik pomocí fyzikálních sil, jako je například vada der Waalsova síla nebo vodíková vazba, tyto gely se nazývají *fyzikálně síťované gely*. Fyzikálně síťované gely mají strukturu tvořenou útvary, které jsou složeny ze shluků makromolekulárních molekul.

Gely mají makroskopickou velikost a elastické vlastnosti. Gely mají charakter tuhé látky, i přesto že disperzní prostředí je kapalné. *Gelace* je proces, při kterém dochází ke vzniku gelu. Vyšší teplota u gelace roztoků vysokomolekulárních látek většinou brání ke vzniku gelu, protože narůstá tepelný pohyb jednotlivých částí systému a dochází ke snížení počtu vazeb mezi molekulami. Naopak snížení teploty zpravidla vede k tvorbě gelu. Ale existují také látky, které potřebují zvýšení teploty, aby došlo k chemickým změnám potřebné pro vznik gelu. Při zvýšení teploty u lyofobních solí vede k rychlejší gelaci [34, 35, 36].

#### 3.4.2 Rozdělení gelů

Gely se dělí dle několika kritérií. Podle obsahu rozpouštědla, se gely mohou dělit na *xerogely* a *lyogely*. Pokud dojde k odstranění disperzního prostředí, dochází k vysoušení gelu, vzniká

tak systém, který se nazývá xerogel, jehož objem je menší přibližně o objem odstraněného rozpouštědla. Xerogel lze opět převést do původního stavu lyogelu nabotnáním. Tím se xerogel, který lze zpět uvést do původního stavu, liší od gelů připravených z lyofobních solů, jejichž sušení je nevratné. *Hydrogelem* se označují gely, je-li disperzní prostředí tvořeno pouze vodou. Pokud je disperzní prostředí tvořeno organickou kapalinou, nazývá se *organogelem*. Dle chemického charakteru disperzního podílu, je možno dělit gely na anorganické a organické.

Dalším kritériem pro dělení gelů, je jejich chování ve vysušeném stavu. Gely se tak dělí na reverzibilní a ireverzibilní.

*Gely ireverzibilní* jsou porézní a ve vysušeném stavu mají přibližně stejný objem jako původní lyogel. Při styku s disperzním prostředím jsou schopné část kapaliny sorbovat, ale do původního stavu se již nikdy nevrátí. Přeměna ireverzibilního gelu na xerogel je tedy nevratná.

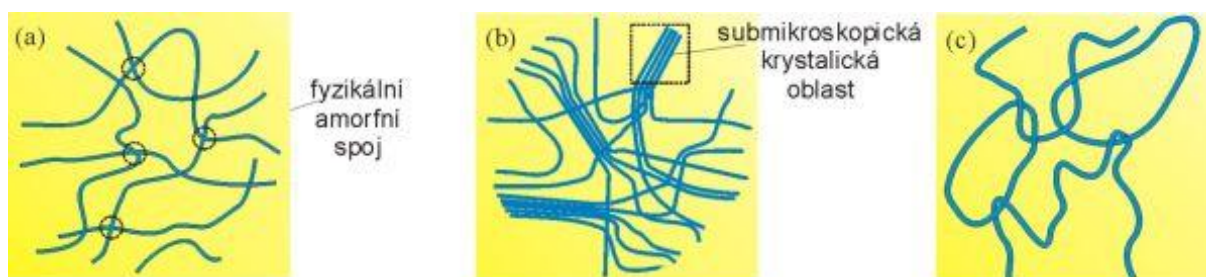
*Gely reverzibilní* jejichž disperzní podíl je na bázi makromolekul. Při vysoušení zmenšují svůj objem a dávají tak kompaktní xerogely. Které umí opět přejít do původního stavu přijímáním disperzního prostředí. Takové chování mají především makromolekulární gely [34, 35, 36, 37].

### 3.4.3 Reverzibilní gely

Prostorová struktura reverzibilního gelu je tvořena sítí makromolekulárních řetězců spojených působením sil fyzikální nebo chemické povahy v místech, které se nazývají uzly.

#### 3.4.3.1 Fyzikálně síťované gely

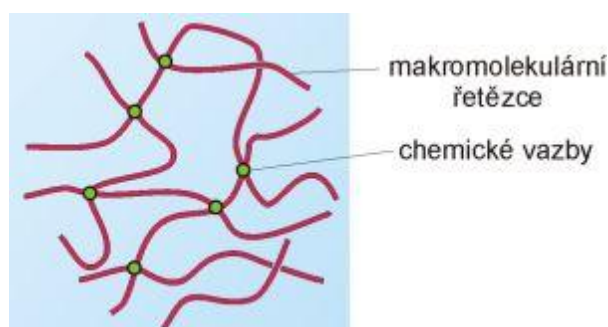
Fyzikálně síťované gely vznikají působením fyzikálních sil (van der Waalsových, polárních, vodíkových můstků), dochází tak ke spojování úseků polymerních řetězců do uzlů nebo spíše uzlových oblastí, ty se tvoří mezi libovolnými úseky makromolekul. Jedna makromolekula může být zapojena do několika uzlových oblastí. Síťová struktura vysokomolekulárních gelů je ukázána na *Obrázku 4*. Ke spojení může docházet při snížení teploty, zvýšení koncentrace nebo zhoršení kvality rozpouštědla. Při vzniku gelu, lze velmi často pozorovat rovnoběžné uspořádání jednotlivých částí molekul, které spolu integrují [35, 37].



*Obr. 4 Síťovitá struktura vysokomolekulárních gelů (a) amorfni gel, (b) gel se submikroskopickými krystalickými oblastmi, (c) geometricky síťovaný gel (dostupné z [35])*

### 3.4.3.2 Kovalentně (chemicky) síťované gely

Kovalentně síťované gely vznikají jako xerogely nebo lyogely podle toho, zda při přípravě bylo přítomno kapalně disperzní prostředí. Kovalentní makromolekulární gel představuje trojrozměrnou síťovitou strukturu, která je tvořena chemickými vazbami. Chemická vazba vzniká buď adiční polymerací nebo nelineární kondenzační polymerací monomerů. Struktura gelu, je díky chemické vazby velmi pevná. Na *Obrázku 5* je naznačena struktura gelu, vytvořeného chemickými vazbami. Vysoušením vznikají xerogely. V rozpouštědlech bobtnají, ale převést je opět na roztok by bylo možné pouze odbouráním chemických vazeb, přičemž se však nezruší vazby, které vznikly při gelaci [35, 37].



*Obr. 5 Struktura kovalentně síťovaného gelu (dostupné z [35])*

### 3.4.4 Botnání

Botnání může být charakterizováno jako proces, při němž reverzibilní xerogel (vysokomolekulární látka) pohlcuje nízkomolekulární rozpouštědlo a zvětšuje při tom svou hmotnost a také objem. Botnání je zvláštním případem rozpouštění. Jedná se o samovolný děj, který se může dít jen u gelů reverzibilních. Rozpouštědlo difunduje do xerogelu, ale vysokomolekulární látky struktury gelu jsou stále pevně zapojeny ve struktuře gelu. Na botnání má vliv i teplota, s rostoucí teplotou vždy vzrůstá rychlost botnání. Jednoduše se může říct, že při botnání gel pohlcuje vodu a tím zvětšuje svůj objem [35, 37].

Botnání polymeru v kapalině bývá kvantitativně popisována *stupněm nabotnání*  $Q$ , definovaným jako hmotnost kapaliny pohlcené jednotkou suchého xerogelu.

$$Q = \frac{m_t - m_0}{m_0} = \frac{\rho \cdot \Delta V}{m_0} \quad (1)$$

kde  $m_t$  je hmotnost bobtnajícího gelu v čase  $t$  od počátku botnání,  $m_0$  je počáteční hmotnost xerogelu,  $\rho$  je hustota kapaliny a  $\Delta V$  je objem pohlcené kapaliny. Stupeň nabotnání  $Q$  je definován jako hmotnost kapaliny pohlcené jednotkou suchého xerogelu. Může se stanovit také jako relativní přírůstek hmotnosti gelu při botnání vážením nebo měřením objemu pohlcené kapaliny  $\Delta V$ . Vážením gelu nebo měřením objemu v různých časech jsme schopni pozorovat i kinetiku botnání až do případného dosažení rovnovážného stavu.

Objemový stupeň nabotnání je definován rovnicí:

$$Q = \frac{V}{V^0} = \frac{1}{\varphi_2} \quad (2)$$

kde  $V$  je objem nabotnaného gelu,  $V^0$  je objem suchého gelu a koeficient botnění  $\varphi$  udává poměr nabotnaného gelu k objemu gelu v suchém stavu. Koeficient  $\varphi$  nelze bezprostředně přepočítat na  $Q$ , pokud při botnění dochází k objemové kontrakci systému.

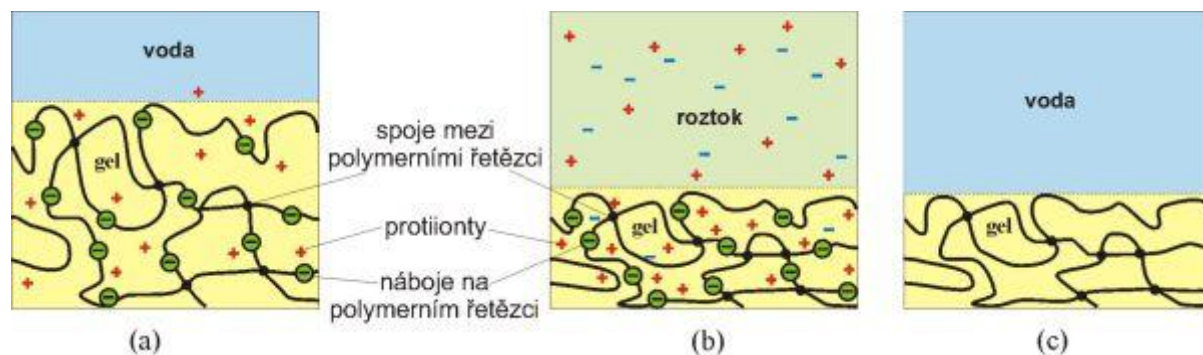
Botnací tlak je mírou afinity gelu k botnění v daném rozpouštědle. K botnění dochází pouze při nižším vnějším tlaku, než odpovídá botnacímu. Vystaví-li se gel vyšší hodnotě tlaku než je botnací, je pohlcená kapalina z gelu naopak vypuzena. Nejvyšší botnací tlak je u xerogelu. S rostoucím stupněm nabotnění klesá až na nulu při dosažení rovnovážného stupně nabotnění  $Q_{max}$ . [34, 35, 37].

*Omezené botnění* je pohlcování kapaliny xerogelem, které se zastaví ve stadiu elastického lyogelu a další kapalina již není pohlcována, i když je v přebytku. Nastává v několika případech, třeba když je polymer s danými rozpouštědlem omezeně mísitelný. Nebo u gelů, jejichž prostorová síť je tvořena kovalentními vazbami, které brání odpoutávání jednotlivých makromolekul a jejich přechodu do roztoku.

Při *neomezeném botnění* dochází opět k pohlcování kapaliny xerogelem, které se nezastaví ve stadiu lyogelu jako u omezeného botnění. V přítomnosti dostatečného množství rozpouštědla, dochází k pohlcování kapaliny až do doby, dokud není dosaženo určitého stupně nabotnění. Poté dojde k zániku styčných bodů a jednotlivé makromolekuly začnou přecházet do roztoku. Takto mohou botnat xerogely s fyzikálními spoji [35].

#### 3.4.4.1 Vliv podmínek na botnění

Proces botnění může být ovlivněno i tím, z čeho je tvořena síť gelu. Velice často je gel tvořen tzv. polyelektrolytem. Polyelektrolyt je vysokomolekulární látka, která obsahuje skupiny schopné elektrolytické disociace. V roztocích může dojít ke vzniku částic, které nesou elektrický náboj. Pokud gel botná v čisté vodě, jsou ve struktuře přítomny malé ionty vzniklé disociací postranních skupin řetězce. Velký rozdíl koncentrací iontů v gelu a ve vodě, zvyšuje snahu molekul vody přecházet do gelu. Pokud gel botná v roztoku soli, dojde ke snížení rozdílu mezi ionty v gelu a v roztoku soli a to má za následek, že gel se v určitém stupni odbotná. To znamená, že gel v roztoku soli botná mnohem hůř než v čisté vodě. Botnění gelů za různých podmínek je zobrazeno na *Obázku 6*.



Obr. 6 Botnění gelů za různých okolností (dostupné z [35])

Zajímavou skupinou hydrogelů jsou materiály, které jsou citlivé na podněty zvenčí. Podle stimulu, který způsobí změnu, rozlišujeme gely termocitlivé, citlivé na rozpouštědlo, iontovou sílu, pH a elektrické pole a také na biochemicky citlivé gely. Tyto gely reagují na změnu ve svém okolí výrazným nabotáním nebo také odbotáním.

Rychlost botnání se zvyšující se teplotou vždy vzrůstá, protože molekuly kapaliny vykazují intenzivnější tepelný pohyb. Proces botnání může probíhat jak exotermně, tak i endotermně. Při endotermním botnání se rovnovážný stupeň botnání s rostoucí teplotou zvyšuje, při exotermním pochodu se naopak snižuje. Botnání je ovlivněno přítomností elektrolytů a hodnota pH, gelace probíhá nejhůře při hodnotě pH odpovídající izoelektrickému bodu. Velký vliv na botnání má i koncentrace, vyšší koncentrace podporuje gelaci vysokomolekulárních látek. Roste tak četnost srážek a počet vazeb, které se vytvářejí v jednotce gelu [35, 37, 38].

## 4 EXPERIMENÁLNÍ ČÁST

### 4.1 Použité chemikálie

- Destilovaná voda
- MQ voda
- Rašelina Agro
- Kaolin s minimálním obsah 30 % kaolinitu
- Křemenný písek zrnitosti 0,4 – 0,8 mm, Aquasil Filtersand
- Uhličitan vápenatý  $\text{CaCO}_3$
- Superabsorbenty (vzorek A-H)



Obr. 7 Přístroj na MQ vody

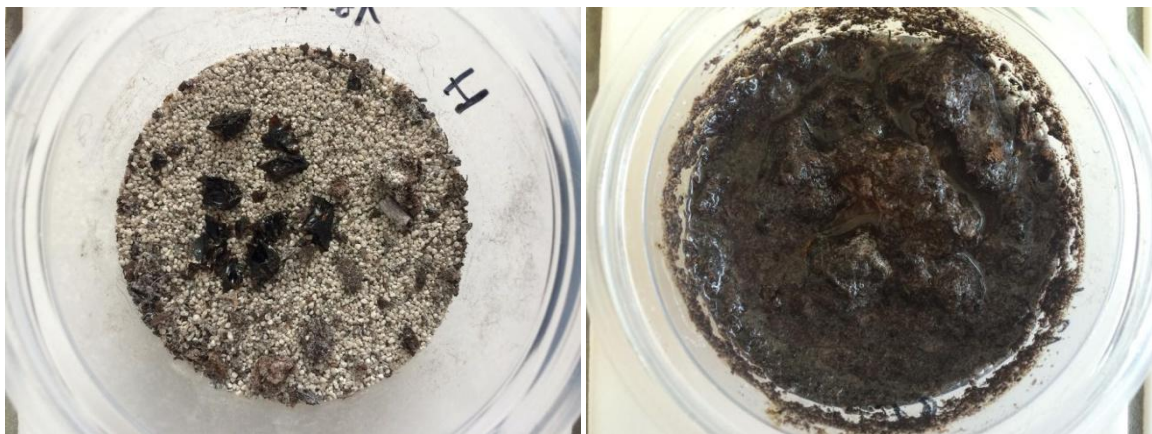
### 4.2 Příprava modelové půdy a „water retention“ test.

Modelová půda byla připravena ze čtyř různých kompozit – rašelina, kaolin, křemenný písek a uhličitan vápenatý  $\text{CaCO}_3$ . Ve větší nádobě bylo smícháno 200 g rašeliny, která byla jemné zrnitosti a bez viditelných zbytků rostlin. Dále bylo postupně přidáno 120 g kaolinu s minimálním obsahem kaolinitu 30 %, 1660 g křemenného písku a 20 g  $\text{CaCO}_3$ . Vše bylo důkladně promícháno, aby došlo k propojení všech čtyř kompozit dohromady. A takto připravená modelová půda, byla použita pro další měření.

Nadále byly připraveny kelímky na *water retention* test, tak že do malého plastového kelímku o předem zjištěné hmotnosti, bylo dáno 100 g předem připravené modelové půdy, 1 g SAP a zalito 100 ml kohoutkové vody. Vše se promíchalo a v určitých časových intervalech byla



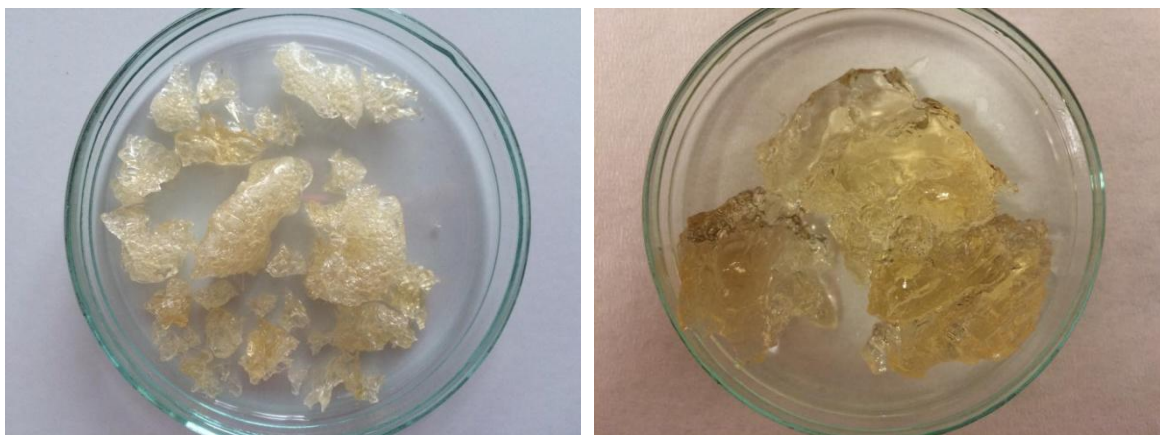
vážena hmotnost kelímku až do dosažení konstantní hmotnosti. Připravený kelímek je zobrazen na *Obrázku 8*.



*Obr. 8 Příprava kelímku na water retentiton test před zalitím vodou (vlevo) a následně nabotnaný gel po zalití vodou (vpravo)*

#### **4.3 Stanovení stupně botnání**

Botnání bylo stanoveno v MQ a kohoutkové vodě. Do uzavíratelných kelímků bylo napipetováno 100 ml MQ vody, do vody byl vložen vysušený a předem zvážený xerogel, hmotnost xerogelu se pohybovala kolem 0,05 g. Poté byl sledován stupeň nabotnání xerogelu v MQ vodě, stejné měření bylo pozorováno i v kohoutkové vodě. Xerogel před a po nabotnáním je zobrazen na *Obrázku 9*.



*Obr. 9 Ukázka suchého gelu v suchém stavu (vlevo) a gelu po nabotnání (vpravo)*

#### **4.4 Sledování vlivu velikosti částic**

Jelikož vzorky podrobené testování v rámci této bakalářské práce mají sloužit jako muštr pro budoucí produkty firmy Amagro s.r.o je důležité, v jaké formě se bude produkt vyrábět. Bezprostředně po polymerizaci se dá získaný produkt vysušit a vzniklý xerogel je poté mechanicky rozmělněn na menší části, mechanické rozmělnění je zobrazeno na *Obrázku 10*. Malé částice měli v průměru velikost okolo 0,4 – 1,0 mm, střední kolem 2,1 – 4,8 mm a velké měli v průměru 6,0 – 14,0 mm. Rozměry částíček byly měřeny vždy z více stran. Je důležité vědět, jaká je optimální velikost výsledných granulek. Z tohoto důvodu bylo tedy provedeno

testování, v němž byly z výsledného produktu vybrány tři rozměrové frakce – velká, střední a malá. Opět byl pozorován stupeň nabotnění a získané výsledky byly mezi sebou porovnávány.



*Obr. 10 Superabsorbent pro vysušení v sušárně (vlevo) a následně rozbitý superabsorbent (vpravo)*



## 5 VÝSLEKDY A DISKUZE

### 5.1 Charakterizace vzorků superabsorpčních polymerů

Všechny použité vzorky A-H byly připraveny v rámci smluvního výzkumu mezi Fakultou chemickou Vysokého učení technického v Brně a firmou Amagro s.r.o. Z důvodu ochrany unikátní receptury nebude v práci zmíněno přesné sloužení použitých vzorků SAP.

Vzorky A a B byly svým složením totožné, až na obsah NPK, kdy ve vzorku A je obsaženo 1 hm. % NPK a ve vzorku B je 10 hm. % NPK.

Vzorky C a D měly stejný obsah NPK jako vzorky A a B. Tedy vzorek C obsahoval 1 hm. % NPK, zatímco vzorek D obsahoval 10 hm. % NPK. Na rozdíl od vzorků A a B byly vzorky C a D obohaceny o přídavek lignohumátu a byl zde vynechán přídavek toxického akrylamidu.

Vzorky E a F byly téměř totožné jako vzorky C a D, ale v jejich složení se stále vyskytoval akrylamid.

Vzorky G a H neměly ve své struktuře přídavek hnojiva NPK a mezi sebou se lišily přítomností akrylamidu.

Složení všech vzorků je pro větší přehlednost uvedeno v *Tabulce 1*.

Tab.1 Složení vzorků superabsorbentů

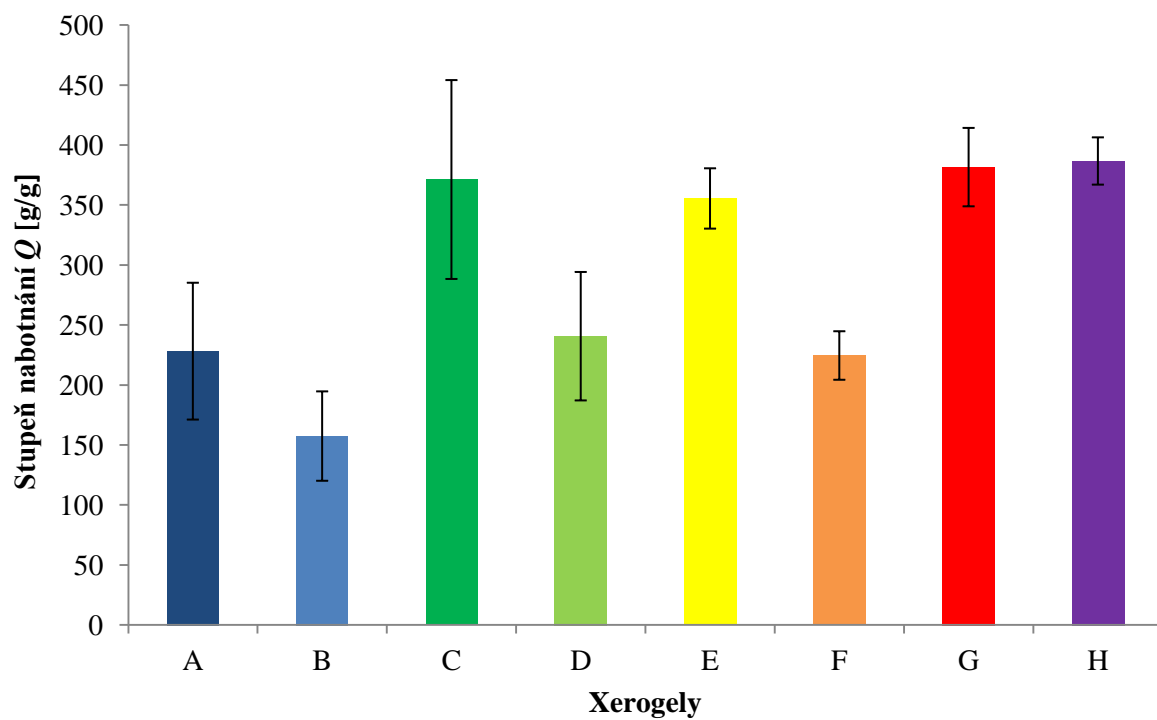
vzorek	A	B	C	D	E	F	G	H
NPK [hm. %]	1	10	1	10	1	10	0	0
lignohumát	ne	ne	ano	ano	ano	ano	ano	ano
akrylamid	ano	ano	ne	ne	ano	ano	ne	ano

### 5.2 Botnací charakteristiky vzorků

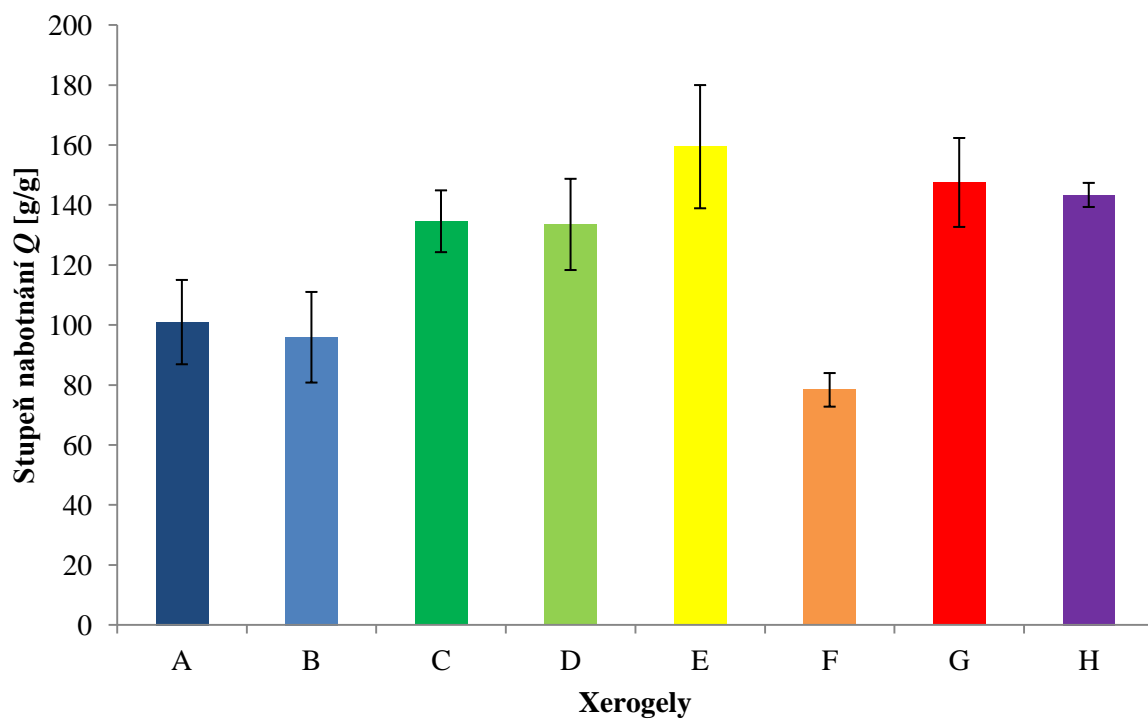
U všech vzorků byl stanoven stupeň nabotnění dle metodiky popsané v kapitole 4.4. Na *Obrázku 11* je zobrazeno botnění všech vzorků SAP v prostředí MQ vody. Lze usoudit, že mnohem lépe botnají gely s nižším přídavkem NPK, což se potvrdilo ve všech případech. Zároveň je z výsledků patrné, že přídavek lignohumátu má na botnací charakteristiky SAP spíše pozitivní vliv. To znamená, že gely, v jejichž složení byl přítomen i lignohumát, botnaly o poznání lépe než gely A a B, v nichž lignohumát chybí.

Botnací charakteristiky vzorků byly stanoveny pomocí  $Q$ , stupeň nabotnění. Stupeň nabotnění lze vypočítat dle následující jednoduché rovnice, kde  $Q$  je charakterizováno jako hmotnost kapaliny pohlcené jednotkou suchého xerogelu. Jednotlivé části rovnice jsou popsány v kapitole 3.4.4.

$$Q = \frac{m_{\tau} - m_0}{m_0} = \frac{\rho \cdot \Delta V}{m_0}$$



Obr. 11 Stupeň nabotnění gelů v prostředí vody MQ



Obr. 12 Stupeň nabotnění v prostředí kohoutkové vody

Na *Obrázku 12* jsou vyobrazeny botnací charakteristiky v prostředí vody získané z běžného vodovodního kohoutku. Zde je patrný obdobný trend jaký byl pozorován v přechodím v případě v prostředí speciálně upravené vody MQ. I zde se tedy projevilo, že lépe botnají gely s nižším přídatkem NPK a gely s přídatkem lignohumátu.

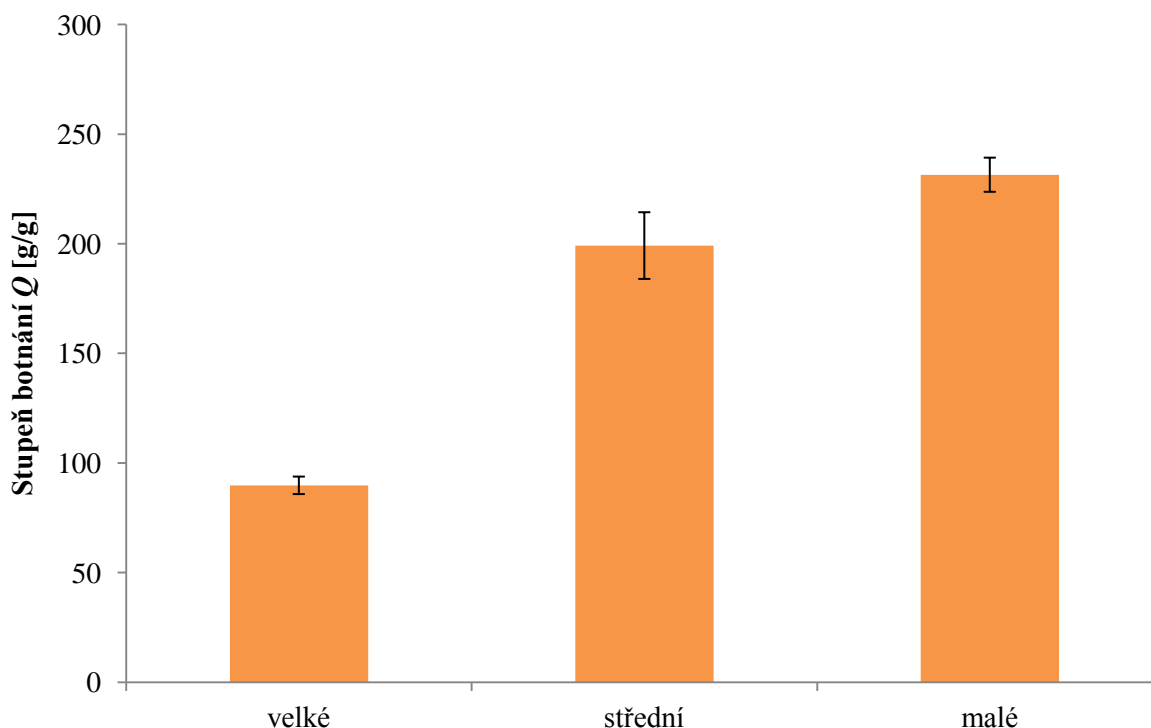
Když se mezi sebou porovnají výsledky uvedené na *Obrázku 11* a *12* je hned na první pohled vidět, že botnání je závislé na přítomnosti iontů v okolním prostředí. Je patrné, že gely botnají dvakrát tak lépe v prostředí vody MQ nežli v běžné vodě, která teče z vodovodního kohoutku. Je to způsobeno tím, že v této vodě je na rozdíl od speciálně upravené vody MQ přítomno mnohem více iontů, které zabraňují gelové struktuře nabotnat do větších rozměrů.

### 5.3 Vliv velikosti částic na stupeň nabotnání

U všech osmi vzorků byly extrahovány tři různé frakce. Z dostupných vzorků bylo nakonec vybráno rozmezí velikosti částice  $l$  pro velké částice  $14 \text{ mm} \geq l \geq 6 \text{ mm}$ , pro střední částice  $4,8 \text{ mm} \geq l \geq 2,1 \text{ mm}$  a pro malé částice  $1,0 \text{ mm} \geq l \geq 0,4 \text{ mm}$ .

Z výsledků je patrné, že velikost částíček xerogelu mají zásadní dopad na botnací charakteristiky vzorků SAP použitých v této práci.

Na *Obrázku 13* je uveden příklad botnání třech různých velikostních frakcí vzorku F, u něhož je nejlépe vidět, že velikost částic má rozhodující vliv na botnací vlastnosti vzorků SAP. Je zřejmé, že čím jsou částice menší, tím lépe botnají. Obdobná je situace i v případě všech ostatních gelů. Grafy jsou uvedeny v příloze 9.



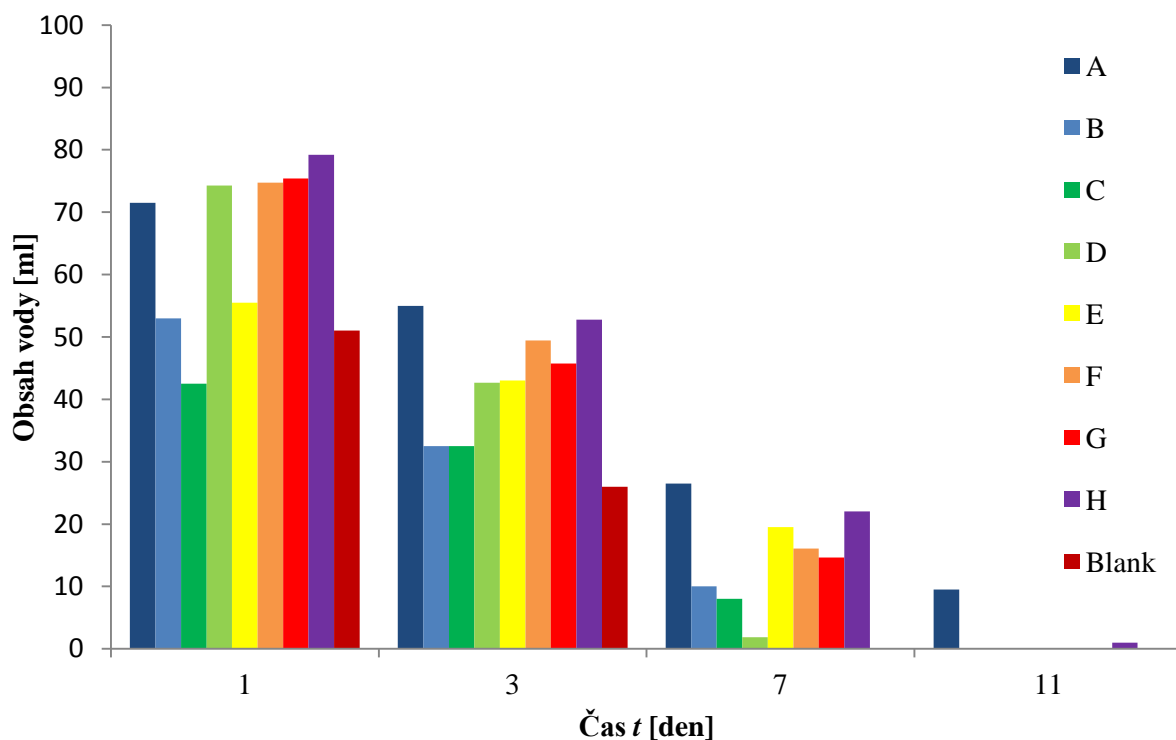
Obr. 13 Vliv velikosti částic na stupeň nabotnání pro vzorek F

#### 5.4 „Water retention“ test

V průběhu tzv. „water retention“ testu bylo sledováno, jaký má vliv přísadek SAP do modelové půdy na rychlost odpařování vody, která byla přidána na začátku testování.

V průběhu třítydenního pozorování byl sledován úbytek přilité kohoutkové vody (100 ml) v kelímcích se 100 g navážkou modelové půdy, k níž bylo přidáno vždy po 1 g z osmi různých vzorků SAP, které jsou charakterizovány v kapitole 5.1. Spolu s těmito vzorky byl sledován i úbytek vody ze systému, kde nebyl přidán žádný vzorek SAP. Takovýto vzorek obsahoval tedy pouze čistou modelovou půdu a byl nazýván jako blank.

Na *Obrázku 14* jsou vyobrazeny všechny systémy, které byly pozorovány. Jedná se tedy o devět stejných systémů obsahujících stejné množství půdy, zálivky a liší se pouze druhem aplikovaného gelu. Posledním ze systémů je již zmíněný blank, který neobsahoval přísadek žádného gelu.

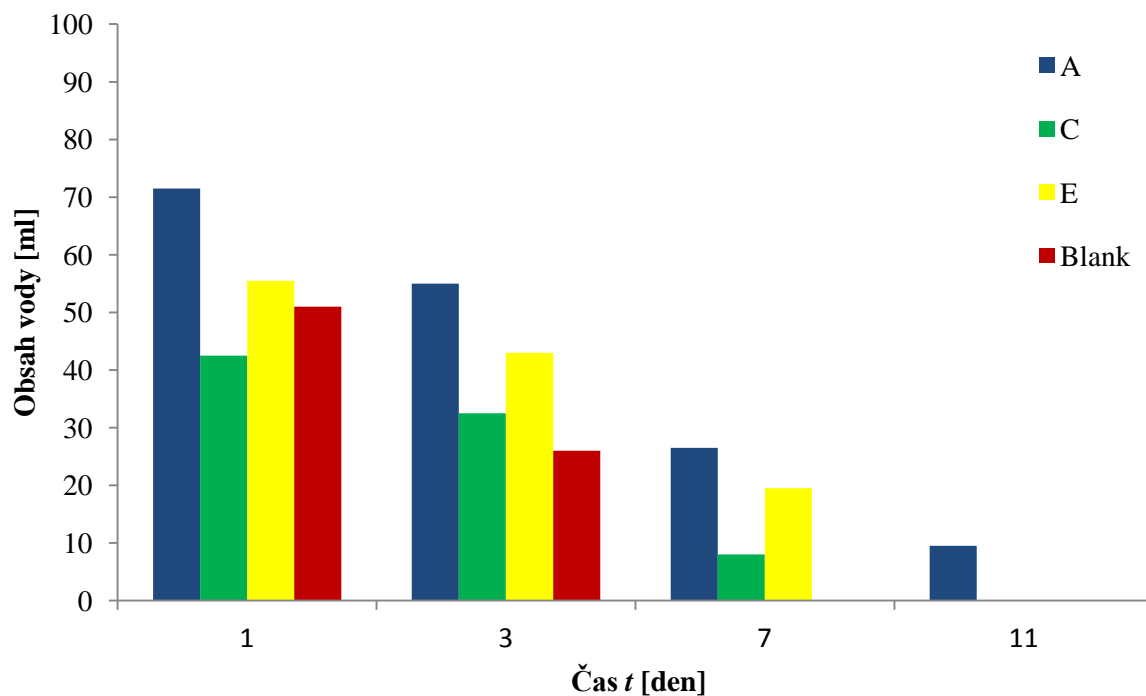


*Obr. 14 Množství vody zadržené v systému v časovém horizontu*

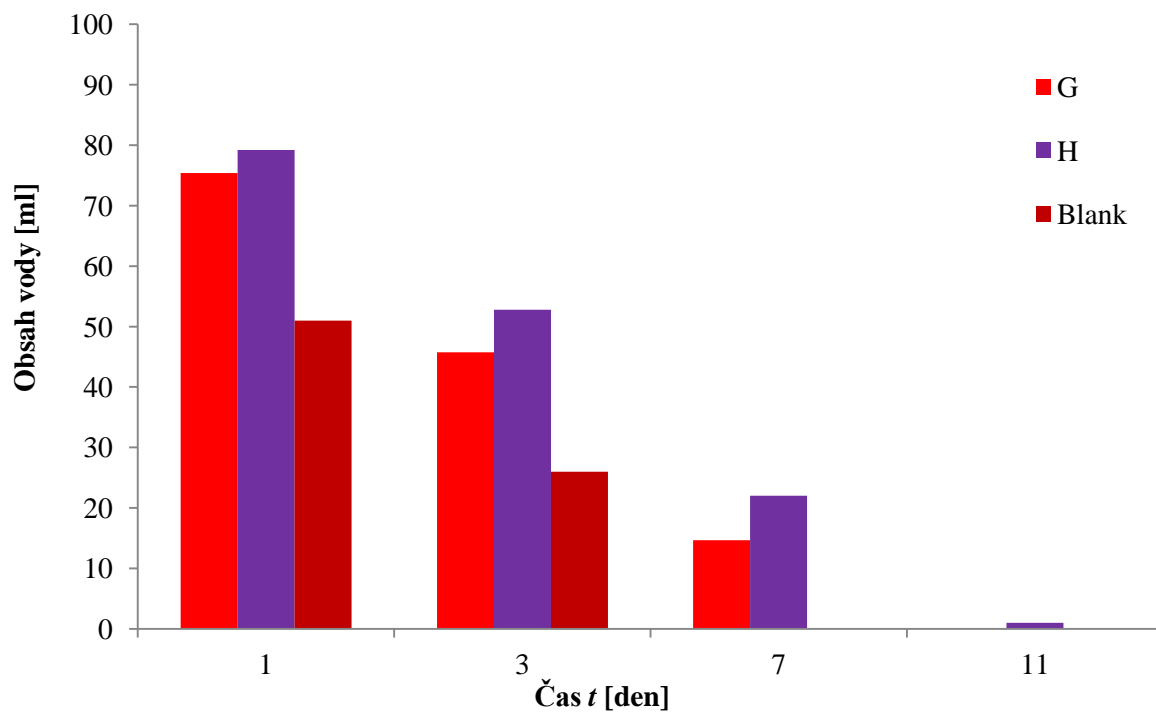
Z tohoto testu jednoznačně vyplývá, že přísadek SAP do půdy podporuje její schopnost udržet si v sobě přijatou vodu. Toto tvrzení je potvrzeno v grafu, který je uveden na *Obrázku 14*, kde je vidět, že už sedmý den po aplikaci zálivky do systému bez přísadky SAP není v modelové půdě přítomna žádná voda z aplikované zálivky.

Rovněž je zde potvrzeno, že velice dobře vodu zadržují v půdě gely, které mají nižší přísadek NPK. Jedná se o gely A, C a E, jejich množství zadržené vody je znázorněno v časovém horizontu 11 dní na *Obrázku 14*. Gely G a H neobsahují přísadek NPK vůbec a též u nich lze pozorovat velice dobrou zádrž vody, jak je vidět na *Obrázku 14*. Nejlepších výsledků pak

dosáhly vzorky A a H, které i po 11 dnech pozorování měli stále ve své struktuře obsaženu vodu.



Obr. 15 Zádrž vody gelů s nižším obsahem NPK + blank



Obr. 16 Zádrž vody gelů bez obsahu NPK + blank

## 6 ZÁVĚR

Úkolem bakalářské práce bylo sledovat chování SAP v modelové půdě a průběh jejich botnání v prostředích s různou iontovou silou. Práce byla založena na shromáždění podkladů pro řešeršní část, která tvoří její teoretický základ. A také byla provedena experimentální část navazující na znalosti chování superabsorpčních polymerů za různých podmínek.

V prostředí modelové půdy byl prováděn tzv. *water retention* test, prostřednictvím něhož byla sledována schopnost zadržování a postupné uvolňování vody zkoumanými vzorky SAP. Bylo zjištěno, že přidavkem SAP do půdy, se zvyšuje schopnost půdy zadržet vodu. Vlhkost nejlépe zadržovali gely A a H, u kterých i po 11 dnech byla stále přítomna voda. V obou případech se jedná o vzorky, které ve své struktuře obsahují pouze limitované množství aktivních látek, což je NPK a lignohumát. Bylo zjištěno, že SAP zkoumané v této práci se dají použít jako zdroje závlahy i jako hnojivo současně, ale jen v omezených koncentracích aplikovaných výživových preparátů. Jejich vyšší koncentrace způsobují omezení botnací schopností, což vede k nižší závlahové účinnosti.

Dalším experimentem bylo botnání SAP jak v MQ vodě tak v běžné kohoutkové vodě. Bylo zjištěno, že mnohem lépe gely botnají v MQ vodě, která je oproti kohoutkové vodě méně bohatá na ionty, které brání botnání gelu. A také bylo prokázáno, že botnání je zřetelně lepší bez přidavku NPK. U SAP B, D a F byl příravek NPK největší, proto jejich botnací schopnost oproti gelům bez příravku NPK nebo jen s malým příravkem, je mnohem menší. Byl prokázán i pozitivní vliv na botnání příravkem lignohumátu.

Další částí experimentu bylo sledování vlivu velikosti částic na průběh botnání. Botnací charakteristiky byly pozorovány pro tři různé rozměry krystalků xerogelu SAP. Ve všech případech bylo potvrzeno, že nejlépe botnají preparáty blížíci se svou strukturou prášku. Tedy i velikost částic má prokazatelný vliv na botnání SAP. Čím jsou částice SAP menší, tím se zvyšuje povrchová plocha, jíž je xerogel schopen do sebe absorbovat vodu.

Tato předložená práce vede ke zjištění, že SAP mají v oblasti environmentálních a hospodářských aplikacích velkou budoucnost. Dokáží totiž nejen řešit problémy špatného hospodaření půdy s vodou, ale snižují i aplikační dávky použitých hnojiv, čímž zabraňují zbytečným ekonomickým ztrátám a zároveň tak omezují znečištění životního prostředí.

## 7 POPUŽITÁ LITERATURA

- [1] SD – Humatex: Informace o huminových látkách [online]. [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <<http://www.humatex.cz/cs/obecne-informace/draselne-soli-huminovych-a-fulvonovych-kyselin.html>>.
- [2] [online]. [cit. 2015-04-04]. Dostupné z : <<http://www.incan.cz/index.php/huminove-latky.html>>.
- [3] RAJU, M. PADMANABHA a K. MOHANA RAJU. Design and synthesis of superabsorbent polymers. *Journal of Applied Polymer Science*. 2001, vol. 80, issue 14, s. 2635-2639. DOI: 10.4016/5644.01.
- [4] TROJAN, Miroslav. Vybrané kapitoly z anorganické technologie: (Kyselina fosforečná a její sole, průmyslová hnojiva, další průmyslově významnější anorganické sloučeniny). 1. vyd. Pardubice: VŠCHT, 1991, 177 s. ISBN 80-851-1338-4.
- [5] LIANG, Rui, Mingzhu LIU a Lan WU. Controlled release NPK compound fertilizer with the function of water retention. *Reactive and Functional Polymers*. 2007, vol. 67, issue 9, s. 769-779. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2006.12.007.
- [6] Dostupné z: <<http://www.amagro.com/co-jsou-to-huminove-latky.html>> [online]. [cit. 2015-05-02].
- [7] WEBER, J. Humintech®| Definition Of Soil Organic Matter & Humic Acids Based Products 2008, [online]. [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <[http://www.humintech.com/001/articles/article\\_definition\\_of\\_soil\\_organic\\_matter.html](http://www.humintech.com/001/articles/article_definition_of_soil_organic_matter.html)>.
- [8] Humic & Fulvic Acids: Sales increasing, fair and unfair competition as well!. NEW AG INTERNATIONAL [online]. [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <[http://www.amagro.com/content/file/NewAg11\\_09englcz.pdf](http://www.amagro.com/content/file/NewAg11_09englcz.pdf)>.
- [9] WEBER, J.: Properties of humic substances [online]. [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <<http://www.ar.wroc.pl/~weber/kwasy2.html>>.
- [10] [online]. [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <<http://www.chempoint.cz/huminove-latky.html>>.
- [11] LIU, Guodong, Lincoln ZOTARELLI, Yuncong LI, David DINKINS, Oingren WANG a Monica OZORES-HAMPTON. *Controlled-Release and Slow-Release Fertilizers as Nutrient Management Tools*. In: *EDIS - Electronic Data Information Source - UF/IFAS Extension*. University of Florida, 2014. [online]. [cit. 2015-09-05].
- [12] MO, Chu, Zhu SHU-QUAN, Li HUA-MIN, Huang ZHAN-BIN a Li SHU-QIN. Synthesis of poly(acrylic acid)/sodium humate superabsorbent composite for agricultural use. *Journal of Applied Polymer Science*. 2006, vol. 102, issue 6, s. 5137-5143. DOI: 10.1002/app.24661.

- [13] LU, Shaojie, Menglin DUAN a Songbai LIN. Synthesis of superabsorbent starch-graft-poly(potassium acrylate-co-acrylamide) and its properties. *Journal of Applied Polymer Science*. 2003, vol. 88, issue 6, s. 1536-1542. DOI: 10.1002/app.12025.
- [14] MARANDI, G. Bagheri, N. SHARIFNIA a H. HOSSEINZADEH. Synthesis of an alginate–poly(sodium acrylate-co-acrylamide) superabsorbent hydrogel with low salt sensitivity and high pH sensitivity: ČSN EN ISO 3166 (97 1002). *Journal of Applied Polymer Science*. 2006-09-05, vol. 101, issue 5, s. 2927-2937. DOI: 10.1002/app. 23373. [online]. [cit.2015-04-04]. Dostupné z : <<http://doi.wiley.com/10.1002/app.23373>>.
- [15] BARTELS, V. *Handbook of medical textiles*. Philadelphia: Woodhead Pub., 2011, xxv, 566 p. Woodhead publishing in textiles, no. 100. ISBN 08-570-9369-X.
- [16] LI, Wei; ZOU, Lizhuang; ZHU, Shuquan. Synthesis and characterization of potassium humate-acrylic acid-acrylamide hydrogel. *Journal of Polymer Research*. [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupný z: <[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)>.
- [17] [online]. [cit. 2015-05-06] Dostupné z: <<http://www.stockosorb.net>>.
- [18] ZHANG, Junping; LI, An; WANG, Aiqin. Synthesis and characterization of multifunctional poly(acrylic acid-co-acrylamide)sodium humate superabsorbent composite. *Reactive & Functional Polymers* [online].[2015-05-06]. Dostupný z : <<http://www.sciencedirect.com>>.
- [19] OMIDIAN, H., S.A. HASHEMI, P.G. SAMMES a I. MELDRUM. A model for the swelling of superabsorbent polymers. *Polymer*. 1998, vol. 39, issue 26, s. 6697-6704. DOI: 10.1007/springerreference\_217527.
- [20] BORCHARD, W., JABLONSKI a Y MASUDA. The thermodynamic water retention capacity of solutions and gels. *Water Research*. 2003, vol. 37, issue 2, s. 17-45. DOI: 10.1016/b978-012394690-4/50084-0.
- [21] [online]. [cit. 2015-05-02] Dostupné z: <<http://www.vumop.cz/>>.
- [22] DAVIDSON, Drew, Frank X. GU a Richard M. WILKINS. 2012. Materials for Sustained and Controlled Release of Nutrients and Molecules To Support Plant Growth. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. Vol. 6, issue 4, s.343-356.
- [23] DU, CW, Jm ZHOU a A SHAVIV. Release characteristics of nutrients from polymer-coated compound controlled release fertilizers. *Journal of Polymers And The Environment*. SPRINGER/PLENUM PUBLISHERS, 2006, vol. 14, issue 3, s. 223-230.
- [24] NODA, Isao a Michael Matthew SATKOWSKI. THE PROCTER & GAMBLE COMPANY. Polyacetones; erosion control [patent]. US 10/309,997, US6903053 B2. Udeleno 7. červen 2005
- [25] LICHNER, L., ŠÍR, M., TESAŘ, M.: Testování retenční schopnosti půdy. In *Aktuality šumavského výzkumu II*. Vimperk: Správa NP a CHKO Šumava, 2004, s. 63-67.

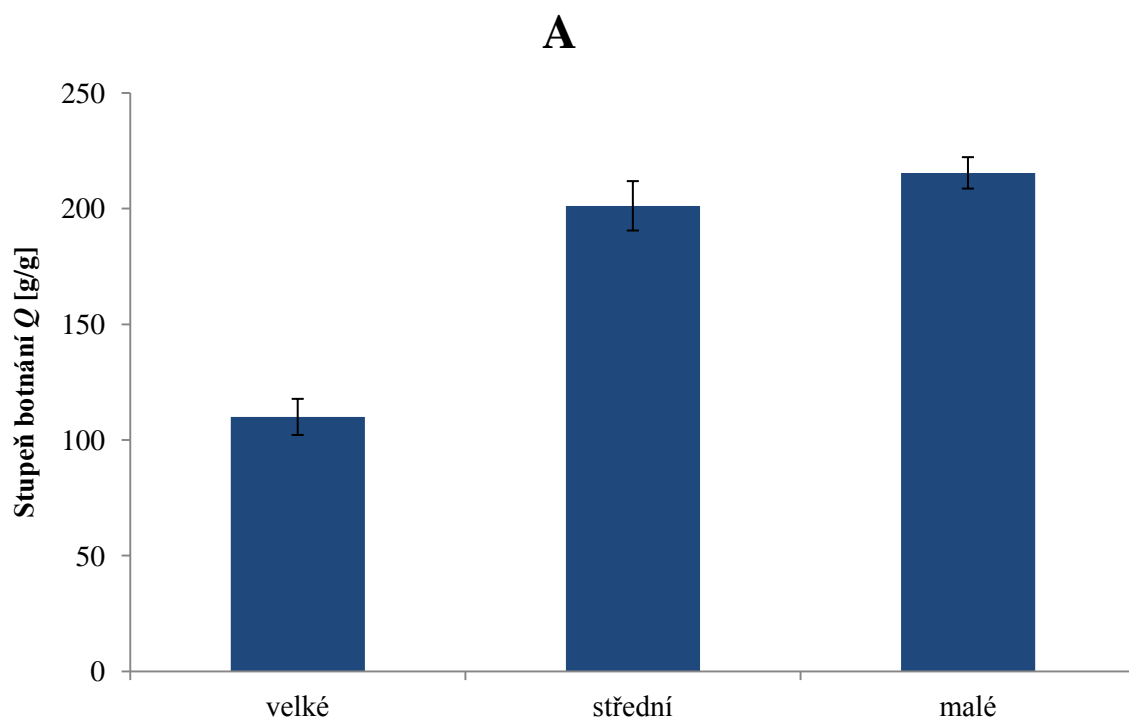


- [26] Zahrada web. SALAŠ, Petr. Využití odpadní kůry ve školkařství [online]. 2003 [cit. 2015-04-04].
- [27] LI, Qian, Zuohao MA, Qinyan YUE, Baoyu GAO, Wenhong LI a Xing XU. 2012. Synthesis, characterization and swelling behavior of superabsorbent wheat straw graft copolymers. *Bioresource Technology*. 118: 204-209. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.03.028. ISSN 09608524. Dostupné také z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852412004671>>.
- [28] KEPÁK, František. Průmyslové odpady. Vyd. 2. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, Fakulta životního prostředí, 1 CD-ROM. ISBN 978-80-7414-228-4.
- [29] MIROSLAV ŠIMEK. Základy nauky o půdě. 2., upr. a rozš. vyd. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Biologická fakulta, 158 s. ISBN 80-704-0747-6.
- [30] TOMÁŠEK, Milan. MIROSLAV ŠIMEK. Půdy České republiky. 2., dopl. vyd. Praha: Český geologický ústav, 2000, 67 s. ISBN 80-707-5403-6.
- [31] VRBA, Vladimír, HULEŠ, Ludvík (2006): Humus - půda - rostlina (1) Humus a půda. [online]. [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/humus-puda-rostlina-1-funkce-humusu-v-ekosystemu>.
- [32] VALLA, Miloš. Pedologické praktikum. 2. vyd., 1. dotisk. Praha: ČZU FAPPZ, 2006, 151 s. ISBN 80-213-0914-8.
- [33] VRBA, Vladimír, HULEŠ, Ludvík (2006): Humus- půda – rostlina (2). Humus a půda. [online]. [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/humus-puda-rostlina-2-humus-a-puda>.
- [34] KLOUDA, Pavel. Fyzikální chemie: studijní text pro SPŠCH. 2., upr. a dopl. vyd. Ostrava: Pavel Klouda, 2002, 139 s. ISBN 80-863-6906-4.
- [35] BARTOVSKÁ, Lidmila. Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav. 5. přeprac. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005, 244 s. ISBN 80-708-0579-X.
- [36] KVÍTEK, Libor; PANÁČEK, Aleš. Základy koloidní chemie. Univerzita Palackého v Olomouci, 2007
- [37] POUCHLÝ, Julius. Fyzikální chemie makromolekulárních a koloidních soustav. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 1998, 198 s. ISBN 80-708-0331-2.
- [38] H. GULREZ, Syed K., Saphwan AL-ASSAF a Glyn O. Hydrogels: Methods of Preparation, Characterisation and Applications. *Progress in Molecular and Environmental Bioengineering - From Analysis and Modeling to Technology Applications*. InTech, 2011-08-01, vol. 60, issue 15, s. 1638-1649. DOI: 10.5772/24553

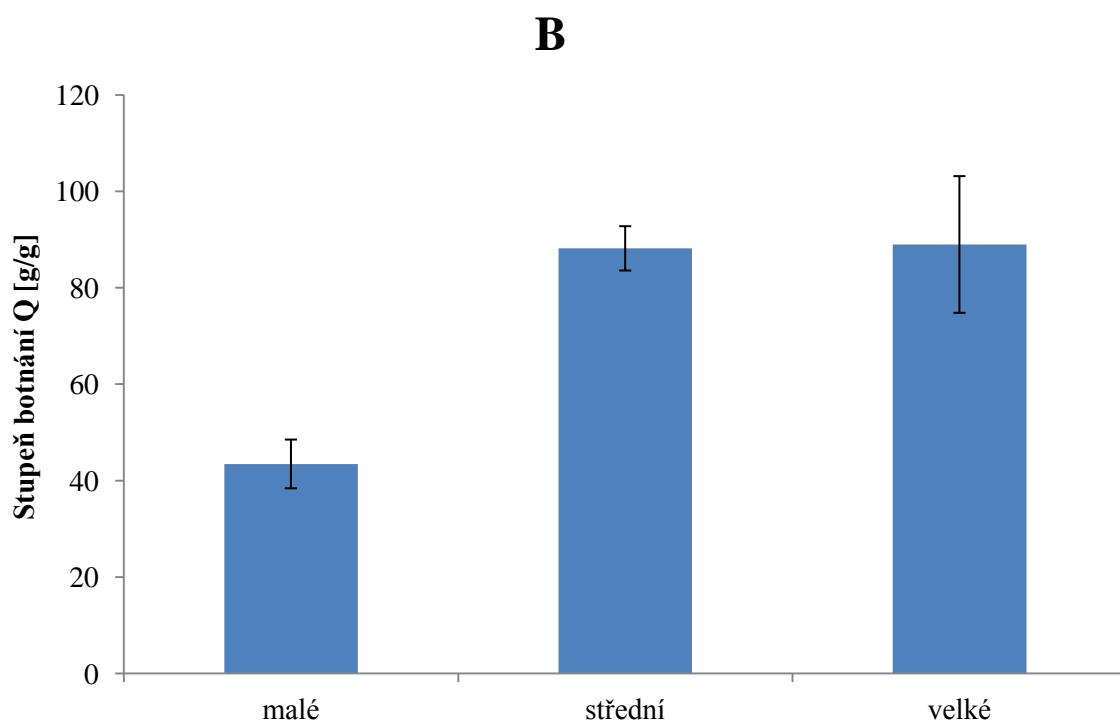
## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>Zkratka</i>	<i>Význam zkratky</i>
H	humínové látky
HK	humínové kyseliny
FK	fulvokyseliny
HU	huminy
CRF	system řízeného uvolňování hnojiva ( <i>controlled release fertilizers</i> )
hm. %	hmotnostní procento
V	objem nabotnaného gelu
$V^0$	objem suchého gelu
$\varphi_2$	objemový zlomek polymeru v nabotnaném gelu
$m_\tau$	hmotnost botnajícího gelu v čase od počátku botnění
$m_0$	je počáteční hmotnost xerogelu
$\rho$	hustota kapaliny
$\Delta V$	objem pohlčené kapaliny.
WRC	vodní retenční kapacita ( <i>water retention capacity</i> )
SAP	superabsorpční polymery

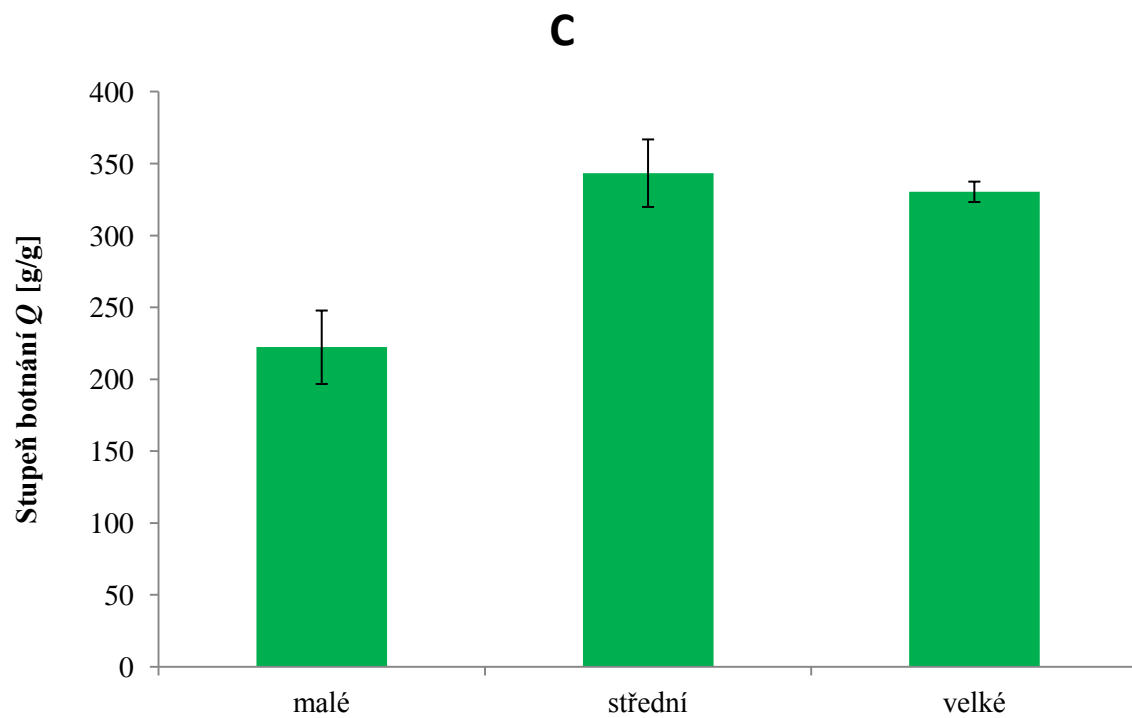
## 9 PŘÍLOHA



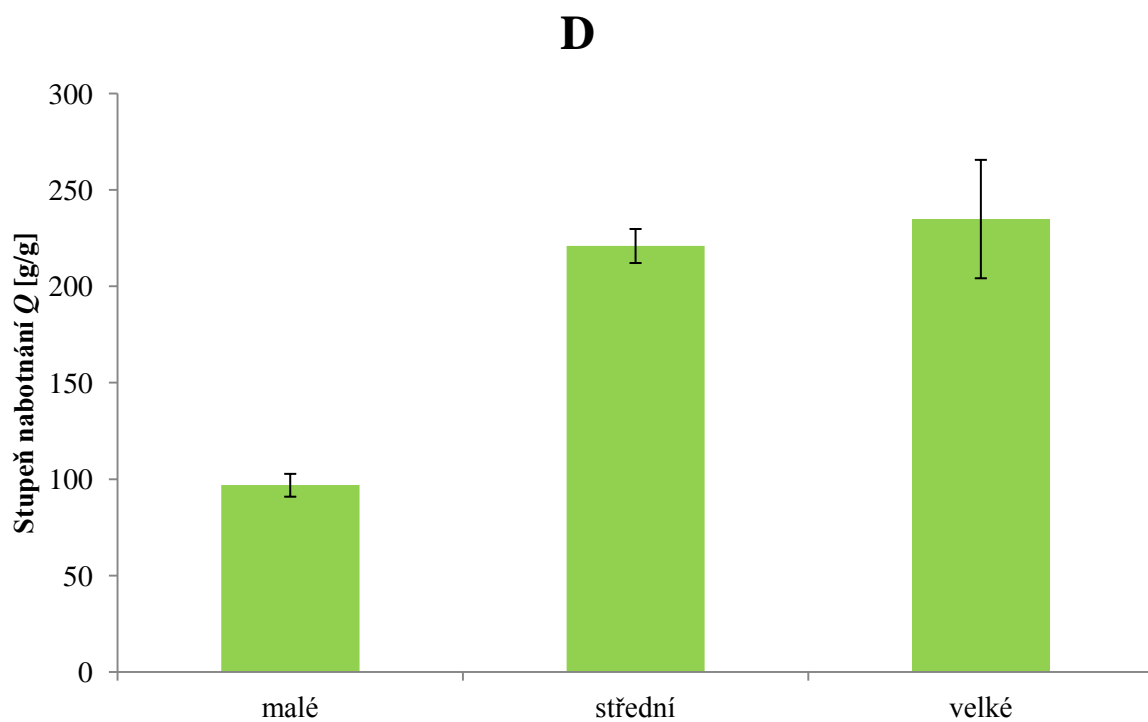
*Příloha č. 1 Vliv velikosti částic na stupeň nabotnění pro vzorek A*



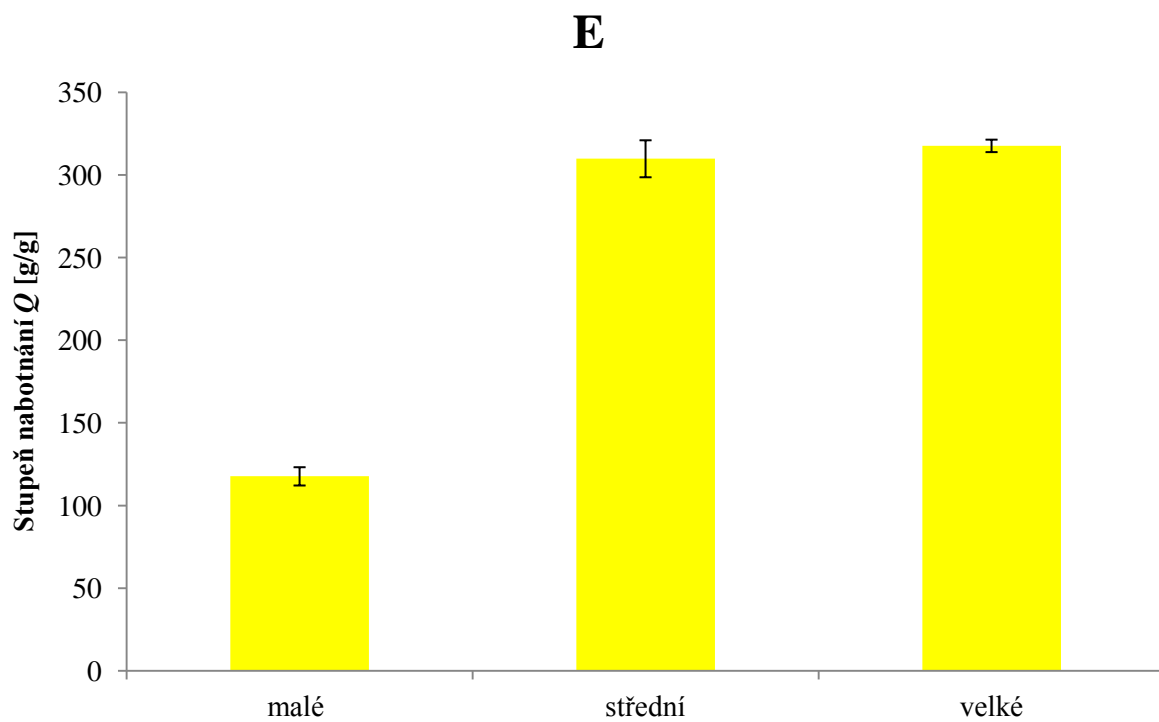
*Příloha č. 2 Vliv velikosti částic na stupeň nabotnění pro vzorek B*



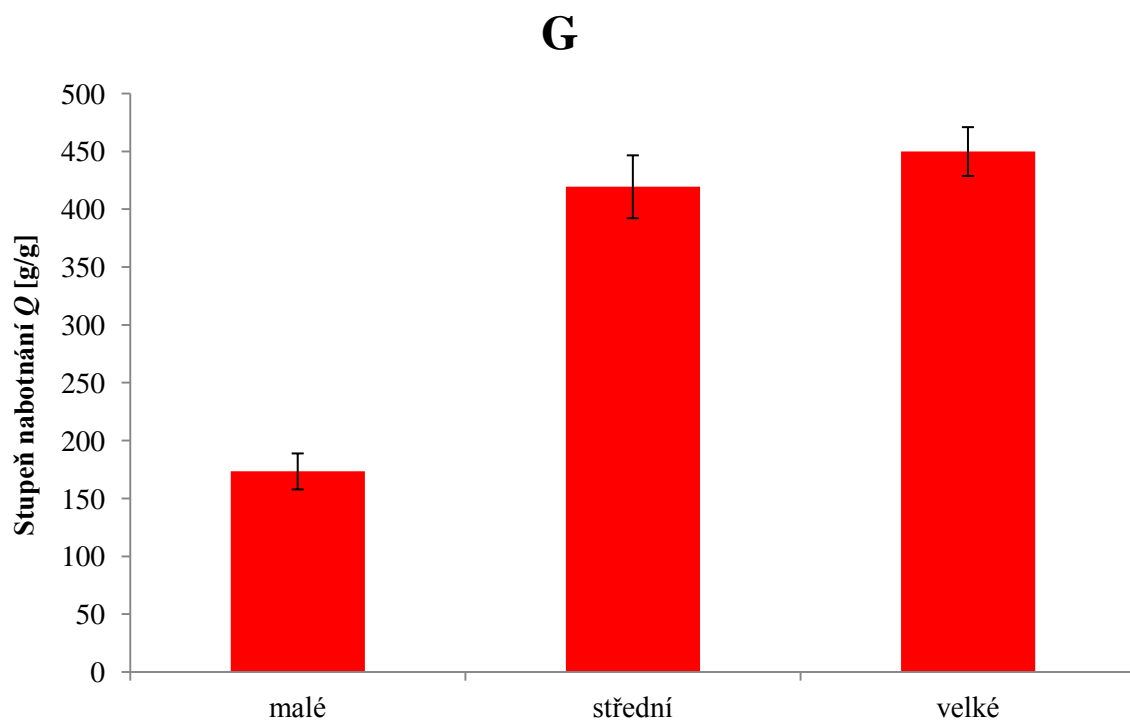
**Příloha č. 3** Vliv velikosti částic na stupeň nabotnění pro vzorek C



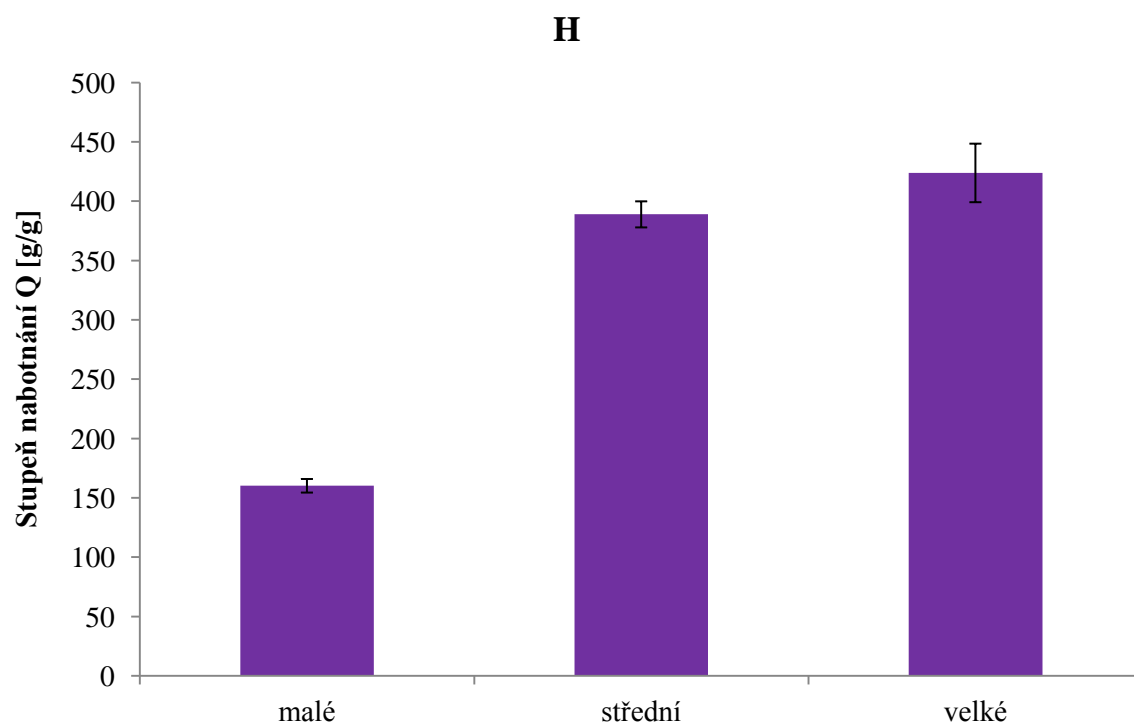
**Příloha č. 4** Vliv velikosti částic na stupeň nabotnění pro vzorek D



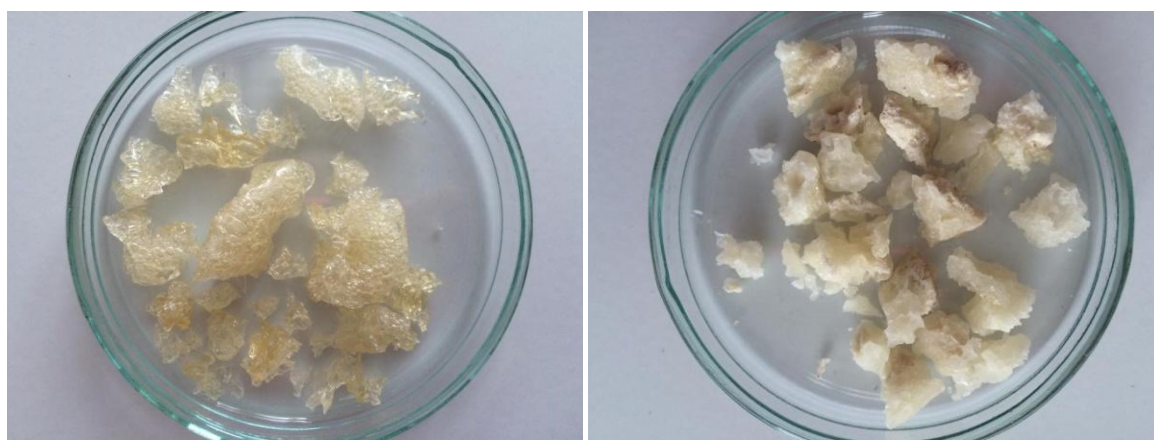
***Příloha č. 5** Vliv velikosti částic na stupeň nabotnění pro vzorek E*



***Příloha č. 6** Vliv velikosti částic na stupeň nabotnění pro vzorek G*



**Příloha č. 7** Vliv velikosti částic na stupeň nabotnění pro vzorek H



**Příloha č. 8** Suchý superabsorbent A (vlevo) a suchý superabsorbent B (vpravo)



***Příloha č. 9 Suchý superabsorbent C (vlevo) a suchý superabsorbent D (vpravo)***



***Příloha č. 10 Suchý superabsorbent E (vlevo) a suchý superabsorbent F (vpravo)***



***Příloha č. 11 Suchý superabsorbent G (vlevo) a suchý superabsorbent H (vpravo)***